

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL:  
MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

# **DISEÑO MECÁNICO DE UN INTERFAZ HÁPTICO PARA REALIDAD VIRTUAL**

**Autor: Andrés Vélez Escorial**  
**Tutor: Javier González-Quijano**  
**Director: Mohamed Abderrahim**

**Febrero 2011**





## AGRADECIMIENTOS

*A mi familia que siempre estuvo ahí, incluso en los momentos difíciles cuando tienes ganas de tirar la toalla, siempre con su apoyo incondicional. A pesar de que algunos dirían que es su deber yo se lo agradeceré eternamente.*

*A mi tutor Javier por su comprensión y ayuda en los momentos del proyecto en que mis conocimientos eran más limitados y sobre todo por hacerme ver las cosas desde otros puntos de vista y a comprender que las cosas siempre se pueden mejorar ” Porque la vida es un proceso iterativo”.*

*A Alejandro por su inestimable ayuda en la realización de este proyecto, gracias por aportar tu experiencia en el diseño siempre pensando en la fabricación y por sus innumerables consejos para ir mejorando día a día los diseños. Ánimo con tu tesis.*

*También quiero agradecer este proyecto a todos los compañeros de laboratorio (profesores y becarios) y compañeros que estaban realizando sus proyectos con especial mención al director del proyecto, Mohamed, gracias por tu apoyo para que este proyecto saliera adelante.*

*Por último quería aportar una cita que se puede aplicar en cualquier ámbito de la vida y que me parece que es algo que deberíamos tener en cuenta cuando nos enfrentamos a un reto en nuestras vidas:  
“La gloria no consiste en no caer nunca sino en levantarse todas las veces que hagan falta”*







## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Motivación y origen del proyecto .....	10
2. Objetivos concretos del proyecto .....	14
3. Introducción a la realidad virtual .....	16
3.1 ¿Qué es la realidad virtual?.....	17
3.2 Historia de la realidad virtual .....	19
3.3 Distintas clasificaciones de Realidad Virtual .....	21
3.3.1 Clasificación según el grado de inmersión.....	21
3.3.2 Clasificación de la RV según la interfaz con el usuario .....	21
3.4 Principales aplicaciones de la Realidad Virtual .....	24
3.5 Componentes de la Realidad Virtual .....	31
4. Tecnología háptica .....	36
4.1 Aplicaciones de la tecnología háptica .....	37
4.2 Ventajas y desventajas del uso de la tecnología háptica .....	38
4.3 Clasificación de los dispositivos hápticos .....	38
4.4 Principales dispositivos hápticos comerciales.....	41
4.5. Estado del arte de los dispositivos hápticos.....	45
4.6 Conclusiones del estado del arte.....	54
5. Requisitos de diseño e implementación del dispositivo háptico.....	56
5.1 Arquitectura general del sistema .....	57
5.2 Estudio de requisitos.....	58
5.2.2 Estudio de peso y tamaño.....	68
5.2.3 Ergonomía .....	69
6. Propuesta de diseño.....	74
6.1 Diseño global del sistema .....	75
6.2 Componentes .....	76
6.2.3 Acoplamiento a la mano.....	82
6.2.5 Propuesta de material para la implementación.....	85
7. Simulación y análisis del mecanismo .....	86
7.1 Simmechanics .....	87
7.1.1 Exportar un ensamblaje de SolidWorks a Simmechanics.....	87
7.1.2 Análisis cinemático .....	91
7.1.4 Conclusiones .....	106
7.2 Análisis de elementos finitos mediante Ansys .....	107
7.2.1 ¿Qué es Ansys y cómo funciona? .....	107
7.2.2 Obtención del modelo de elementos finitos .....	110
7.2.3 Unidades en el modelo .....	112
7.2.7 Conclusiones del análisis de elementos finitos .....	124
8. Presupuesto detallado.....	134
8.1 Elaboración del proyecto técnico.....	135
8.2 Componentes .....	136



8.3 Mano de obra (trabajo en taller) .....	137
Bibliografía.....	138
Planos del mecanismo .....	142

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de ventanas (WOW), en este caso el usuario solamente está rodeado por tres paredes. ....	22
Figura 2: Sistema de realidad aumentada aplicado a la creación de un videojuego. ....	23
Figura 3: Vista de una fábrica virtual.....	24
Figura 4: Un soldado practicando el salto en paracaídas mediante realidad virtual.....	25
Figura 5: Estudio biomecánico de la carrera de un atleta profesional. ....	26
Figura 6: Ciclista entrenando con rodillo virtual. ....	27
Figura 7: Panel con visión en 3D que incorpora el sistema HUVR. ....	27
Figura 8: Un paciente durante una de las sesiones de la “Virtuoterapia”...28	
Figura 9: Vista de un monumento durante un tour virtual.....	30
Figura 10: Modelo biomecánico 3D computerizado del movimiento humano. ....	32
Figura 11: Sistema portátil de captura de movimiento (izquierda) y detalle de un sensor (derecha).....	33
Figura 12: Sistema fotogramétrico.....	34
Figura 13: Phamton. Sensable Technologies .....	42
Figura 14: Haptic Master FCS .....	42
Figura 15: Freedom 6S MPB Technologies.....	43
Figura 16: Cybergrasp.....	43
Figura 17: Cybertouch.....	44
Figura 18: MIT/UTAH Dextrous Hand Master .....	46
Figura 19: Mano robótica creada por la Universidad de Utah y que es teleoperada a través de la mano maestra MIT/UTAH DHM.....	46
Figura 20: Vista de tele operación (izquierda) y guante (derecha).....	47
Figura 21: Mano maestra LRP-DHM creada por el laboratorio de robótica de Paris. ....	48
Figura 22: Sensorglove II desarrollado en la Universidad de Tokyo. ....	49
Figura 23: Cybergrasp y cyberglove desarrollados por la compañía Immersion.....	49
Figura 24: Rutgers Master II diseñada en la universidad Rutgers, EE.UU.....	50
Figura 25: PERCRO-DHM .....	51
Figura 26: Dispositivo de Koyama .....	52
Figura 27: Dispositivo de Koyanagi .....	52
Figura 28: Dispositivo de Sato .....	53



Figura 29: Hiro III diseñado por los laboratorios de Kawasaki y Mouri en la universidad de Gifu (Japón). .....	54
Figura 30: Esquema del sistema háptico.....	57
Figura 31: Partes de la mano humana. ....	60
Figura 32: Articulaciones del dedo. ....	61
Figura 33: Movimiento de Abducción-Adducción. ....	62
Figura 34: El ser humano puede tocarse el meñique con el pulgar. ....	62
Figura 35: Movimiento de flexión. ....	63
Figura 36: Técnicas de agarre (Cutkosky y Howe (1990)).....	63
Figura 37: Tipos de agarre característicos de la tele operación.....	64
Figura 38: Longitud de la mano.....	65
Figura 39: Longitud de la palma.....	65
Figura 40: Anchura de la mano en los metacarpianos.....	65
Figura 41: Longitud del dedo índice.....	66
Figura 42: Anchura del dedo índice,proximal.....	66
Figura 43: Anchura del dedo índice, distal.....	66
Figura 44: Detalle de la sujeción mediante velcro.....	70
Figura 45: Sistema Cyberglove.....	71
Figura 46: Actuadores Dynamixel AX-18.....	72
Figura 47: Planos del actuador.....	73
Figura 48: Exoesqueleto montado sobre mano.....	75
Figura 49: Mecanismo de cuatro barras.....	77
Figura 50: Detalle de la máxima movilidad que permite el mecanismo al dedo.....	77
Figura 51: Levas (Izquierda) y Poleas (Derecha).....	78
Figura 52: Punta del dedo.....	79
Figura 53: Centro de rotación 1.....	80
Figura 54: Centro de rotación 2.....	80
Figura 55: Vista posterior centro de rotación 2.....	81
Figura 56: Detalle de las ranuras.....	82
Figura 57: Detalle pieza de acoplamiento a la mano.....	82
Figura 58: Material termoplástico.....	83
Figura 59: Soporte de actuadores con un actuador colocado.....	83
Figura 60: Detalle de las sujeciones de los actuadores.....	84
Figura 61: Diagrama de bloques creado en Simulink.....	89
Figura 62: Simulación del movimiento del dispositivo para un dedo.....	89
Figura 63: Nombre de las articulaciones del dedo para el análisis cinemático y dinámico.....	90
Figura 64: Función sinusoidal en Simmechanics.....	91
Figura 65: Esquema de conexión de los sensores.....	92
Figura 66: Cuadro de diálogo de los sensores.....	92
Figura 67: Cuadro de diálogo de la función sinusoidal.....	93



Figura 68: Barra de herramientas del menú de simulación.....	94
Figura 69: Detalle Velocidad A1. ....	95
Figura 70: Detalle de un ciclo de la velocidad A1.....	95
Figura 71: Detalle Velocidad A2. ....	96
Figura 72: Zoom para un ciclo Velocidad A2.....	96
Figura 73: Detalle Velocidad A3. ....	97
Figura 74: Detalle un ciclo Velocidad A3. ....	97
Figura 75: Detalle Aceleración A1. ....	98
Figura 76: Detalle Zoom Aceleración A1.....	98
Figura 77: Detalle Aceleración A2. ....	99
Figura 78: Detalle Aceleración A3. ....	100
Figura 79: Detalle Sobreaceleración A1. ....	101
Figura 80: Detalle Sobreaceleración A2. ....	101
Figura 81: Detalle Sobreaceleración A3. ....	102
Figura 82: Eslabones a los que se conectan los tendones. ....	109
Figura 83: Cuadro de diálogo en el que se lleva a cabo la elección de tipo de formato.....	110
Figura 84: Los diferentes tipos de formatos que puede importar Ansys. .	110
Figura 85: Opciones a considerar cuando se importa el modelo. ....	111
Figura 86: Modelo importado. ....	111
Figura 87: Tipo de elemento. ....	112
Figura 88: Elección del tipo de elemento.....	113
Figura 89: Tipo de material.....	113
Figura 90: Propiedades del aluminio.....	114
Figura 91: Opciones de mallado. ....	114
Figura 92: Malla. ....	115
Figura 93: Condiciones de contorno. ....	115
Figura 94: Valores de desplazamiento. ....	116
Figura 95: Solución del problema. ....	117
Figura 96: Deformación de la pieza. ....	118
Figura 97: Deformación de la pieza 2.....	118
Figura 98: Desplazamiento de los nodos. ....	119
Figura 99: Selección del tipo de análisis.....	120
Figura 100: Análisis de Von Mises.....	120
Figura 101: Análisis de Von Mises 2.....	121
Figura 102: Datos numéricos del análisis. ....	121
Figura 103: Detalle del análisis de Von Mises. ....	122
Figura 104: Detalle 2 Análisis de Von Mises. ....	123
Figura 105: Detalle tensiones en el taladro.....	123



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos antropométricos para la mano de la población española (Carmona, 1999).....	67
Tabla 2: Longitud de los eslabones.....	78
Tabla 3: Par en función de la posición a partir de un par fijo.....	103
Tabla 4: Par en función de la posición a partir de un par fijo.....	105

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Par en función de la posición a partir de un par fijo A1.....	104
Gráfica 2: Par en función de la posición a partir de un par fijo A2.....	104
Gráfica 3: Par en función de la posición a partir de un par fijo A3.....	105
Gráfica 4: Par en función de la posición a partir de un par fijo.....	106



## Resumen

La capacidad de operación de los robots manipuladores autónomos es actualmente muy limitada. Es por ello que la teleoperación es la principal alternativa para aquellas aplicaciones que requieran de manipulación diestra de objetos. Además, existen algunos estudios que demuestran la utilidad de los dispositivos de teleoperación para el entrenamiento de los movimientos de robots manipuladores, donde éstos aprenden de los humanos. No obstante, los dispositivos de teleoperación están actualmente muy limitados debido al bajo número de grados de libertad de sus controladores maestros y, sobre todo, a la falta de realimentación háptica avanzada.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un dispositivo háptico para la mano humana que permita la manipulación de objetos en entornos virtuales, bien sea con fines de manipulación teleoperada o con el objetivo de un aprendizaje de movimientos para robots que vayan a operar de forma autónoma. Para lograr este objetivo se ha realizado un estudio general sobre la Realidad Virtual y, también, un estudio específico del estado del arte en dispositivos hápticos con el fin de valorar las ventajas y desventajas de los diferentes diseños realizados hasta el momento. Con las conclusiones obtenidas se ha realizado un diseño preliminar con herramientas CAD (*Solid Works*). Posteriormente se han realizado estudios exhaustivos tanto de la cinemática y de la dinámica del mecanismo como también de la resistencia del material, utilizando para ello un análisis de elementos finitos (*Ansys*) de las piezas claves del diseño realizado. Dichos análisis se han planteado no solo con el objetivo de validar nuestro diseño sino, también, para que se pueda realizar en futuros trabajos un proceso iterativo de optimización de dicho mecanismo, lo que ayudará a aumentar las prestaciones del mismo.



# **1. Motivación y origen del proyecto**



La capacidad de operación de los robots manipuladores autónomos está actualmente muy limitado. Prácticamente, la totalidad de los mismos pueden realizar tareas de agarre de objetos. Sin embargo, no pueden reposicionar y reorientar estos objetos dentro de la mano. Esta capacidad se denomina manipulación diestra y es la que permite a los humanos realizar prácticamente cualquier tarea de manipulación imaginable. Para lograr dicha capacidad en los robots autónomos es necesario el avance tecnológico en diferentes campos entre los que cabe destacar el control, la mecánica y el aprendizaje automático. El campo de la inteligencia artificial, donde se enmarca el aprendizaje automático, es probablemente el que esté menos desarrollado. Mientras dicho campo evoluciona es posible utilizar métodos alternativos para lograr el objetivo de la manipulación diestra de objetos con manos robóticas.

La teleoperación es la principal alternativa para aquellas aplicaciones que requieran de manipulación diestra de objetos. Además, existen algunos estudios que demuestran la utilidad de los dispositivos de teleoperación para el entrenamiento, mediante técnicas de aprendizaje automático, de los movimientos de robots manipuladores. Sin embargo, los dispositivos de teleoperación están muy limitados debido al bajo número de grados de libertad de sus controladores maestros y, sobre todo, a la falta de realimentación de tipo háptica. La háptica es una tecnología de retroalimentación que se aprovecha del sentido del tacto del usuario para simular la interacción entre una parte del cuerpo de este y un objeto virtual. Esta interacción se consigue mediante la estimulación del sentido del tacto aplicando fuerzas, vibraciones y/o movimiento sobre el usuario. Estas estimulaciones ayudan en la creación de objetos virtuales (objetos existentes solo mediante simulación de ordenador), en el control de los mismos y para la mejora de máquinas y dispositivos teleoperados. El avance en este tipo de tecnología se presenta como uno de los grandes retos en los próximos años.

Para la lograr la manipulación de objetos virtuales (bien sea con fines de teleoperación o fines de entrenamiento), es necesario que el usuario tenga la sensación de inmersión dentro de la escena en la que se supone que esta el objeto a manipular. En ambos casos, la Realidad Virtual se puede convertir una de las herramientas más interesantes para llevar a cabo este objetivo. Esta tecnología permite sumergir al usuario en un entorno tridimensional, dónde para interactuar con dicho entorno el usuario se debe valer de dispositivos que simulen los sentidos de los que dispondría en una situación real (vista, oído, tacto, gusto y olfato).





Esta línea de investigación se enmarca dentro del contexto del proyecto europeo HANDLE, el cual trata de estudiar técnicas de control y nuevas tecnologías que mejoren la capacidad de manipulación de las manos robóticas actuales. Dicho proyecto está formado por un consorcio de ocho grupos de investigación y una empresa repartidos en seis países. La Universidad Pierre et Marie Curie de Paris coordina dicho proyecto en el que colabora entre otros el grupo de investigación RoboticsLab de la Universidad Carlos III de Madrid. Para alcanzar el objetivo del proyecto el trabajo se divide en nueve paquetes. Un ejemplo de estos paquetes de trabajo, es el estudio de los movimientos humanos durante tareas de manipulación, con el objetivo de extraer estrategias que puedan aplicarse al control del robot manipulador. Otro paquete de trabajo se centra en el desarrollo de algoritmos de aprendizaje que sean capaces de manejar el conocimiento del entorno de manera inteligente, pudiendo superar la incertidumbre en los modelos intervinientes. Además existe un paquete específico que se centra en la mejora de las capacidades de percepción, incluyendo la táctil y la visual principalmente.

Este trabajo es una línea de investigación complementaria a este proyecto. El objetivo de dicho trabajo es desarrollar un dispositivo háptico para la mano humana que permita la manipulación de objetos en entornos virtuales, bien sea con fines de manipulación teleoperada o con el objetivo del aprendizaje de movimientos para robots que vayan a operar de forma autónoma.





## **2. Objetivos concretos del proyecto**



Los principales objetivos del presente proyecto son:

- Estudio de las diferentes tecnologías utilizados en Realidad virtual para así conseguir una mejor idea acerca de las posibilidades de este campo.
- Análisis del estado del arte en dispositivos hápticos, lo que nos mostrará la evolución de los diseños que se han realizado hasta la fecha.
- Estudio de los requisitos en dispositivos hápticos aplicados a la Realidad Virtual.
- Diseño de un dispositivo háptico que sirva como interfaz para Realidad Virtual.
- Validación del diseño mediante la simulación y análisis de la cinemática, la dinámica y un análisis de elementos finitos.
- Extracción y análisis de las conclusiones obtenidas mediante la simulación del diseño.



# **3. Introducción a la realidad virtual**



### 3.1 ¿Qué es la realidad virtual?

Definir Realidad Virtual (RV, o simplemente VR de su término inglés *Virtual Reality*) es una tarea complicada, ya que existen muy variadas definiciones, de diferentes investigadores, que intentan englobar en una única definición todas las ideas que contiene el término Realidad Virtual. Lo que nos lleva a pensar que Realidad Virtual es un término muy relativo. Por lo tanto en vez de intentar dar una única definición, veremos un cúmulo de definiciones, donde cada una de ellas entrega una idea de lo que se debería entender por realidad virtual:

- *Realidad Virtual* es la experiencia de tele presencia, donde tele presencia es la sensación de presencia utilizando un medio de comunicación.
- *Realidad Virtual* es una manera mediante la cual los humanos visualizan, manipulan e interactúan con computadoras y datos extremadamente complejos.
- *Realidad Virtual* es un paso más allá de lo que sería la simulación por computadores, tratándose más bien de una simulación interactiva, dinámica y en tiempo real de un sistema.
- *Realidad Virtual* consiste en simulaciones tridimensionales interactivas que reproducen ambientes y situaciones reales.
- *Realidad Virtual* es un entorno de tres dimensiones sintetizado por computadora en el que participantes acoplados de forma adecuada pueden atraer y manipular elementos físicos simulados en el entorno y, de alguna manera, relacionarse con las representaciones de otras personas pasadas, presentes o ficticias, o con criaturas inventadas.
- *Realidad Virtual* es un ambiente altamente interactivo donde el usuario participa a través del uso de un computador en un mundo virtualmente real. Es una simulación tridimensional por computadora durante la cual el usuario resulta inmerso tan completamente que esta realidad, de origen artificial, aparenta ser real.



- *Realidad Virtual* es una simulación por computadora, dinámica y tridimensional, con alto contenido gráfico, acústico y táctil, orientada a la visualización de situaciones y variables complejas, durante la cual el usuario ingresa, a través del uso de sofisticados dispositivos de entrada, a mundos que aparentan ser reales, resultando inmerso en ambientes altamente participativos, de origen artificial. Una nueva y sorprendente forma de navegar información.
- *Realidad Virtual* es el medio que proporciona una visualización participativa en tres dimensiones y la simulación de mundos virtuales, siendo dichos mundos el elemento fundamental de un sistema de realidad virtual. La realidad virtual es un entorno generado por computador en el que los participantes pueden entrar físicamente e interactuar con él desplazándose por su interior o modificándolo de cualquier forma. En su forma más simple, un mundo virtual podría estar compuesto por un edificio tridimensional por el que podríamos desplazarnos, aunque sin modificar nada. Sin embargo, con el equipamiento adecuado, los usuarios podrían ver, desplazarse e interactuar a través de estos entornos gráficos generados por computador.

Al igual que con las definiciones de Realidad Virtual, existen también diversos términos para referirse al mismo concepto, tal es el caso de "realidad sintética", "mundos virtuales o ficticios" y "cibespacio", palabras diferentes, mismos significados, idénticas indefiniciones. En todo sistema de Realidad Virtual deben existir una serie de características que son las bases de la misma:

1) La simulación:

Es la capacidad de replicar aspectos suficientes de un objeto o ambiente de forma que pueda convencer al usuario. Los mundos simulados no necesariamente deben regirse por las mismas leyes físicas que en la realidad. Es por esta característica que la Realidad Virtual es aplicable prácticamente en cualquier campo de la actividad humana.

2) La interacción:

Interacción para tener control de la exploración del sistema creado; de no existir esta interacción el sistema no dejaría de ser una película



o recorrido fijado a priori. Para lograr la interacción existen diversas interfaces hombre-máquina, que van desde teclado y mouse hasta guantes o trajes sensoriales. La interactividad con el mundo virtual supone que el usuario pueda mover objetos (además de a sí mismo) y modificarlos, y que tales acciones, produzcan cambios en ese mundo artificial.

### 3) La Percepción:

La percepción es considerado el factor más importante, algunos sistemas de realidad virtual se dirigirán principalmente a los sentidos (visual, auditivo, táctil) por medio de elementos externos (Cascos de Visualización, Guantes de Datos, Cabinas, etc.); otros trataran de llegar directamente al cerebro, evitando así las interfaces sensoriales externas; y otros, los más simples recurrirán a toda la fuerza de la imaginación del hombre para experimentar una realidad virtual relativa. De este modo el usuario puede creer que realmente está viviendo las situaciones artificiales que el sistema de realidad virtual genera. La característica de percepción está asociada con el grado de inmersión que el usuario siente.

## 3.2 Historia de la realidad virtual

Por regla general se reconoce que el termino Realidad Virtual fue acuñado originalmente por *Jaron Lanier*, ex director de *VPL Research*, en 1989 (*Myron Krueger* fue el primero en atribuírselo), para distinguir entre simuladores y la experiencia de inmersión de realidad virtual. Sin embargo, otros autores difieren de esta posición planteando que ya en 1987 *David Zelzer* (*Media Lab*) utilizaba dicha expresión. Aunque el origen exacto del uso de la expresión “Realidad Virtual” es ambiguo, y más bien anecdótico, la cronología del desarrollo de la misma es bastante más clara:

- En 1958, la *Philco Corporation* desarrolla un sistema basado en un dispositivo visual montado en un casco, controlado por los movimientos de la cabeza del usuario; algunos años después, Iván Sutherland y otros crean el Casco Visor HMD, (Head Mounted Display) mediante el cual el usuario podía examinar, moviendo la cabeza, un ambiente gráfico. *Morton Heiling* inventa y opera el Sensorama.





- En 1969, *Myron Krueger* crea ambientes interactivos que permiten la participación de cuerpo entero, en eventos apoyados por computadores. Por aquel entonces, diversos artistas ofrecían espectáculos que incluían imágenes, sonidos, vibraciones y hasta olores, que junto con cámaras que captaban sus movimientos sumergían al espectador en un mundo irreal, reproducido en una pantalla gigante. Paralelamente, *Frederick Brooks* de la Universidad de Carolina del Norte en *Chapel Hill*, trabajaba en un proyecto para lograr que los usuarios muevan objetos gráficos mediante un manipulador mecánico.
- Para fines de los 70, en el *Media Lab* del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) se obtiene el Mapa Filmado de Aspen (EE.UU). una simulación de vídeo de un paseo a través de la ciudad, donde el usuario puede recorrer sus calles y edificios. *Tom de Fanti* fue el inventor del guante de datos en 1976; su diseño fue mejorado posteriormente por *Tom Zimmerman*, dando origen al *DataGlove*, diseñado, originariamente, para poder tocar una guitarra virtual o imaginaria.
- Aunque fue *Jason Lanier* quien comenzó a creer y a divulgar las posibilidades de las nuevas tecnologías y el que se hizo famoso en todo el mundo al presentar en 1984 una versión mejorada del guante de datos para la NASA. Ese mismo año, *Michael McGreevy* y sus colegas de la NASA desarrollan Lentes de Datos, con los cuales el usuario puede mirar el interior de un mundo gráfico mostrado en un computador.
- En los inicios de los 90, los sistemas de realidad virtual salen de los ambientes de laboratorios en busca de aplicaciones comerciales, apareciendo las cabinas de entrenamiento para pilotos de guerra, los conocidos simuladores de vuelo, los recorridos virtuales, entre otras muchas aplicaciones.
- En la actualidad, estamos aún en presencia del crecimiento y consolidación de las técnicas y recursos de la realidad virtual, el cual ha sido posible gracias al esfuerzo e interés combinado de científicos, militares y visionarios, y porque no decirlo, al dinero de las empresas que ven en ella una nueva y prometedora fuente de hacer dinero.



### 3.3 Distintas clasificaciones de Realidad Virtual

Debido al gran número de aplicaciones y posibilidades que tiene la Realidad Virtual, es casi imposible realizar una única clasificación que abarque todos los tipos de realidades.

#### 3.3.1 Clasificación según el grado de inmersión

La clasificación más general que puede aplicarse a los sistemas de Realidad Virtual es si son inmersivos o no inmersivos:

- Sistemas inmersivos: Presentan al usuario un mundo virtual basado en su posición y orientación, proporcionándole estímulos artificiales a uno o varios sentidos (normalmente vista, oído y tacto) que son registrados mediante el uso de diferentes dispositivos (cascos, visores, guantes, etc.).
- Sistemas no inmersivos: También utilizan el ordenador y se valen de otros medios como internet, en el cual podemos interactuar en tiempo real con diferentes personas en espacios y ambientes que en realidad no existen sin la necesidad de dispositivos adicionales al ordenador y sus periféricos. Nos acercamos en este caso a la navegación, a través de la cual ofrecemos al sujeto la posibilidad de experimentar (moverse, desplazarse y sentir) determinados espacios, mundos, lugares, como si se encontrase en ellos. La realidad virtual no inmersiva ofrece un nuevo mundo a través de una ventana de escritorio. Este enfoque no inmersivo tiene varias ventajas sobre el enfoque inmersivo como son el bajo coste y la fácil y rápida aceptación de los usuarios.

#### 3.3.2 Clasificación de la RV según la interfaz con el usuario

Según el interfaz utilizado para la inmersión en el entorno virtual, los sistemas de realidad virtual pueden clasificarse en:

- Sistemas de ventanas: Se trata de un sistema no inmersivo. Se utiliza una serie de pantallas para mostrarnos el mundo virtual. Son conocidos como WOW (*Window On a World*). Un tipo de sistema de ventanas lo podemos ver en la Figura 1 donde se aprecia como el usuario está rodeado por una serie de pantallas que reproducen el mundo virtual en el que se intenta sumergir el usuario. En este tipo

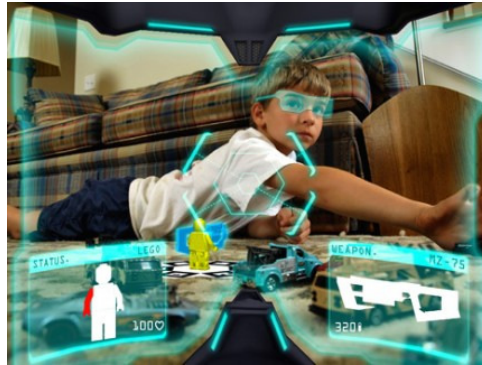
de sistemas el usuario puede estar completamente rodeado por pantallas o solamente tener varias pantallas delante de él. El grado de inmersión será mayor cuantas más pantallas nos rodeen.



**Figura 1: Sistema de ventanas (WOW), en este caso el usuario solamente está rodeado por tres paredes.**

- Sistemas de mapeo por video: Se basa en la filmación mediante cámaras de video y el *tracking* mediante sistemas como los sensores inerciales, de una o más personas y la incorporación de dichas imágenes a la pantalla del computador, donde podrán interactuar, en tiempo real, con otros usuarios o con imágenes gráficas generadas por el computador. De esta forma, las acciones que el usuario realiza en el exterior de la pantalla (ejercicios, bailes, etc.) se reproducen en la pantalla del computador permitiéndole desde fuera interactuar con lo de dentro. El usuario puede, a través de este enfoque, simular su participación en aventuras, deportes y otras formas de interacción física. Otra interesante posibilidad del mapeo mediante vídeo consiste en el encuentro interactivo de dos o más usuarios a distancia, pudiendo estar separados por centenares de kilómetros. Este tipo de sistemas puede ser considerado como una forma particular de sistema inmersivo.
- Sistemas de telepresencia o teleoperación: Esta tecnología vincula sensores remotos en el mundo real con los sentidos de un operador humano. Los sensores pueden hallarse instalados, por ejemplo, en robots o en los extremos de algunas herramientas. Así el usuario puede operar el equipo como si fuera parte de él.
- Sistemas de Realidad Mixta o Aumentada: Al fusionar los sistemas de telepresencia y realidad virtual obtenemos los denominados sistemas de Realidad Mixta. Aquí las entradas generadas por el computador se mezclan con entradas de tele presencia y/o la visión de los usuarios del mundo real. Mediante el uso de un visor

transparente HMD se modifica la percepción real del usuario mediante la introducción de objetos en un entorno real que solo podremos ver a través del HMD. En la Figura 2 podemos ver un ejemplo de este sistema: Un niño jugando a un juego en el que sin salir de su salón y a través de unas gafas especiales puede vivir todo tipo de aventuras.



**Figura 2: Sistema de realidad aumentada aplicado a la creación de un videojuego.**

- *Sistemas de Realidad Virtual en segunda persona:* Este es un tipo de sistema no inmersivo. En este tipo de sistemas una imagen en movimiento del usuario es proyectada junto con otras imágenes en una extensa pantalla donde el usuario puede verse a sí mismo como si estuviese en la escena. Para lograr esto, el participante es ubicado frente a una pantalla de video, en la cual es proyectada la imagen misma del participante pero sumada su imagen de video, con otra imagen utilizado como fondo o ambiente. Mediante un software que realiza la detección de entornos es posible realizar cambios dentro de la escena. A diferencia de los sistemas de inmersión los sistemas en segunda persona involucran percepciones y respuestas en tiempo real a las acciones de los humanos involucrados, sin estar éstos sometidos al uso de cascos, guantes u otros tipos de interfaces inmersivos. Un ejemplo de este tipo de sistemas es un juego de golf virtual en el que el usuario se ve a sí mismo en un campo de golf golpeando una pelota virtual.

### 3.4 Principales aplicaciones de la Realidad Virtual

Entre las principales aplicaciones de esta nueva “realidad” destacan:

- *Simulación de procesos de fabricación industriales*: Cada vez más sectores de negocios utilizan la realidad virtual con el fin de acelerar y mejorar la producción de sus productos. Sistemas para simular situaciones reales (como la reacción de una sillita de coche para bebé en un choque) permiten de esta forma ahorrar tiempo y dinero a sus fabricantes.



Figura 3: Vista de una fábrica virtual.

Estos sistemas parecían, hasta hace poco, estar sólo al alcance de la industria de los videojuegos, el ejército y la aviación. Sin embargo la reducción de sus precios con el paso de los años ha permitido que otras industrias también accedan a ellos. Por ejemplo, antes, para poder hacer imágenes 3D se necesitaban ordenadores de hasta un millón de dólares, hoy, ordenadores para los mismos fines cuestan menos de 1000 dólares (unos 780 euros); Por otro lado, iniciativas como la apertura del llamado *Vislab* en el *Joshi Research Center* de la *Wright State University* de Ohio, están permitiendo a las empresas aprovechar la realidad virtual sin tener que comprar la tecnología: un alquiler de 1.000 dólares al día permite a las empresas usar este laboratorio y sus potentes ordenadores para simular los aspectos de sus productos que necesiten. De este modo se puede conocer cómo funcionarían en una serie de situaciones hipotéticas, sin tener que montar un escenario real, mucho más caro. El ejemplo más claro es el de la fábrica virtual que podemos ver en la Figura 3.



Gracias a estas experiencias, pueden identificarse problemas de diseño en los productos o entornos de trabajo que no suelen verse hasta que los prototipos ya están fabricados. La simulación de previa de un sistema productivo, generalmente, conlleva un producto final mejor, por lo que la realidad virtual se perfila cada vez más como una buena estrategia de fabricación. Para el sector industrial, la realidad virtual ya representa un mercado de 1.500 millones de dólares, con un crecimiento anual de entre el 10% y el 12%.

- *La aplicación dentro del campo militar:* Los simuladores de vuelo son, hoy en día, una herramienta fundamental para el entrenamiento de pilotos. Son sistemas muy sofisticados y costosos que incorporan todo tipo de interfaces para simular la situación real dentro de un avión así como de las distintas maniobras.

También se han desarrollado cascos que incorporan herramientas que proveen a los pilotos de información adicional sobre el área que están sobrevolando, como indicadores de blancos, visión nocturna, mapas de las bases, etc.

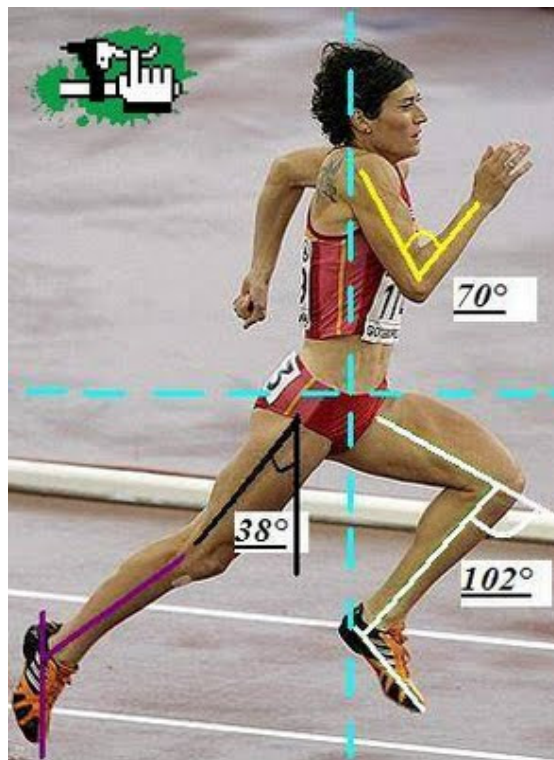
El ejército estadounidense es uno de los principales clientes de las tecnologías de Realidad Virtual. De hecho, en muchas ocasiones ha encargado, a las compañías de simulación gráfica, juegos basados en estas técnicas para utilizarlos en la instrucción de los soldados que formarán parte de las fuerzas de élite.



**Figura 4: Un soldado practicando el salto en paracaídas mediante realidad virtual.**

El objetivo es entrenar a los soldados para que desarrollen la capacidad de tomar decisiones adecuadas en períodos de tiempo íntimos en medio de situaciones críticas. Entrenamientos como el mostrado en la Figura 4 permiten a los paracaidistas practicar el salto sin tener que jugarse la vida en cada salto, como se hacía hasta ahora.

- Entrenamiento deportivo: La Realidad virtual ha supuesto un gran impulso en el mundo del entrenamiento deportivo gracias a que puede recrear unas condiciones muy parecidas a las que se encuentran los deportista durante la práctica del deporte, se pueden estudiar, por ejemplo, cual es la postura más adecuada para el cuerpo durante la realización de la actividad en cuestión mediante técnicas biomecánicas. En la Figura 5 se puede ver cuáles son los ángulos óptimos de las extremidades durante la carrera.



**Figura 5:** Estudio biomecánico de la carrera de un atleta profesional.

De esta manera se consigue optimizar altamente el rendimiento del deportista. Actualmente, está permitiendo que se batan records que han permanecido durante décadas en lo más alto del atletismo internacional.

Otra interesante novedad de la Realidad virtual aplicada al deporte son los simuladores que permiten a los deportistas practicar su deporte aún cuando las condiciones meteorológicas no lo permiten. Como es el caso de este rodillo virtual que podemos ver en la Figura 6. Este rodillo virtual permite a los ciclistas la práctica de su deporte favorito sin tener que soportar las inclemencias de los fenómenos meteorológicos. El simulador de entrenamiento virtual te sumerge en

un mundo virtual que ofrece la posibilidad de ver, oír y sentir una carrera. Además de darte la posibilidad de ajustar la velocidad del viento e incluso recrea el efecto aerodinámico de colocarse “a rueda” de un contrincante.



**Figura 6: Ciclista entrenando con rodillo virtual.**

- Medicina: La medicina es uno de los campos más importantes para las aplicaciones de realidad virtual. En ella la realidad virtual se aplica para un número muy grande de disciplinas dentro del campo de la medicina. Estas aplicaciones corresponden al tipo de realidad virtual inmersiva.



**Figura 7: Panel con visión en 3D que incorpora el sistema HUVR.**

Plantas médicas virtuales, equipos virtuales y pacientes virtuales proporcionan a los estudiantes posibilidades de estudiar las experiencias de alto riesgo. Pero las aplicaciones con pacientes reales también existen. De hecho, las endoscopias en estéreo pueden transmitir dibujos tridimensionales a los ojos del médico a través de una unidad montada sobre la cabeza para que pueda hacer una cirugía, como si estuviera dentro del paciente.



Una de los sistemas más recientes aplicables a la medicina es el sistema HUVR (*Heads-up Virtual Reality*). El sistema combina un panel en 3D de alta definición, un espejo semi-plateado y un controlador sensible al tacto. En la Figura 7 puede verse el panel 3D del HUVR.

El HUVR puede emplearse para visualizar y manipular una imagen en 3D del cerebro de una persona tomada a través de una resonancia magnética. Un médico puede llegar a sentir un defecto en el cerebro, en lugar de limitarse a verlo.

- Psicología: En varios países, algunos psicólogos han comenzado a explorar las posibilidades de la Realidad Virtual para curar fobias y traumas. Un ejemplo de ello es la compañía *Virtually Better*, dedicada a investigar el tratamiento de las fobias más extremas mediante el uso de simulaciones por ordenador.



**Figura 8:** Un paciente durante una de las sesiones de la “Virtuoterapia”.

Durante la terapia virtual, un paciente con cualquier tipo de fobia puede enfrentarse a sus temores sentado delante de un ordenador, desde el consultorio. Generalmente el sistema de Realidad Virtual está compuesto por un casco, unos auriculares y un sillón colocado sobre una plataforma móvil, en el que el paciente es sometido a una simulación tridimensional por ordenador con sonido envolvente de la situación que le produce angustia. Una sesión de una hora de una de estas máquinas puede salir por 150 dólares y cada paciente puede necesitar hasta ocho sesiones antes de poder abordar su miedo en la realidad.

Otro ejemplo de tratamiento de fobias mediante el uso de terapias basadas en Realidad Virtual es el usado por el *Virtual Reality Center*. En este centro se utiliza la Realidad Virtual en terapias conducidas cognitivas para el tratamiento de pacientes con trastornos



de pánico o fobias específicas. En este tipo de terapias se usan cascos de Realidad Virtual donde se monta la exposición con pequeños monitores de televisión y auriculares para recibir la señales tanto auditivas como visuales (Figura 8). A pesar del choque emocional que suponen estas terapias, sus creadores afirman que la eficacia ronda el 90%.

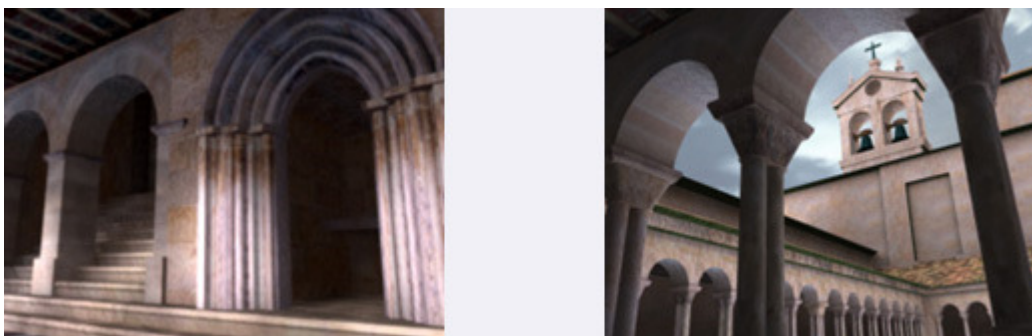
- Aplicaciones en vuelos espaciales: Debido a la falta de un sistema de propulsión capaz de acortar el tiempo de los futuros viajes espaciales (por ejemplo el viaje a Marte con la actual tecnología son 6 meses de viaje solamente contando con la ida), se están desarrollando alternativas que permitan la posibilidad de mejorar la convivencia durante un viaje tan largo. El proyecto español *Earth (Emotional Activities Related To Health)*, tratará de evitar, mediante programas de realidad virtual, que la claustrofobia y la añoranza del planeta Tierra acabe por afectar emocionalmente a la tripulación. Este proyecto, desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, la Universidad de Valencia, la Universidad Jaume I de Castellón y la Universidad de Cádiz, es el único estudio español que formará parte del programa *Mars500*, con la colaboración de la NASA y la Agencia Espacial Europea, dónde se recreará con todo detalle la realización de un viaje de seis astronautas al Planeta Rojo.

La función del proyecto *Earth* es que los seis astronautas puedan alcanzar estados de alegría o relajación con un simple ejercicio, el de dejarse llevar por un programa de realidad virtual al que accederán con unas gafas especiales. Para ello se incluye la simulación de dos parques naturales, en los que habrá música clásica e imágenes relajantes, además de la elaboración de un blog personal, en el que cada viajero podrá insertar elementos multimedia que le produzcan sensaciones positivas, serán la vía de escape para la presión emocional que los astronautas sufrirán durante su aventura.

- Aplicaciones pedagógicas: Según afirma [4] a partir de los experimentos llevados a cabo por [2] se puede llegar a la conclusión de que con esta tecnología los estudiantes "pueden aprender de manera más rápida y asimilar información de una manera más consistente que por medio del uso de herramientas de enseñanza tradicionales (pizarra, libros, etc.), ya que utilizan casi todos sus sentidos.

Los estudiantes no sólo pueden leer textos y ver imágenes dentro de un casco de Realidad Virtual, sino que además puede escuchar narraciones, efectos de sonido y música relacionados con el tema que están aprendiendo. Por lo que cada vez es mayor el número de centros de enseñanza en los que se utilizan aplicaciones de este tipo.

Uno de los tradicionales problemas de la aplicación de la Realidad Virtual en la enseñanza es que, debido a su elevado precio, esta tecnología no está al alcance de los estudiantes y profesores. La aparición del lenguaje VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) ha paliado en cierta medida este inconveniente, haciéndola asequible a cualquier persona que posea un ordenador y un navegador de Internet. Obviamente, sólo con estos dispositivos se pierde la capacidad de interacción. La principal ventaja que ofrece VRML es la posibilidad de divulgación y la gran capacidad de integración que posee con el resto de recursos de Internet.



**Figura 9: Vista de un monumento durante un tour virtual.**

- Turismo y ocio: La Realidad Virtual tiene una gran capacidad a nivel visual ya que es capaz de representar lugares reales. Por ello su aplicación al turismo puede proveernos de innumerables aplicaciones como las visitas virtuales interactivas relativas al patrimonio histórico, uso de la Realidad Aumentada en lugares de interés, promoción a través de internet o en soportes digitales de asociaciones de comerciantes y hosteleros (compra virtual, localizador 3D de bares y restaurantes), etc. En la Figura 9 podemos ver una recreación de varios lugares de interés turístico que sirven al usuario para familiarizarse con un lugar sin tener que haber estado en el mismo.

En cuanto al ocio, los videojuegos se han convertido en un elemento muy importante de la oferta de entretenimiento. Prueba de ello son la numerosa oferta de nuevos juegos totalmente interactivos que



permiten al jugador sumergirse en la realidad de éstos mediante dispositivos ópticos (*eye toy* de *playstation* o *kinect* de *XBOX*) e inerciales. Estos dispositivos nos permiten interactuar con los videojuegos a través de los movimientos de nuestro cuerpo sin necesidad de pulsar botones en un mando.

### 3.5 Componentes de la Realidad Virtual

Al igual que no existe una única definición del término tampoco existe un único componente que represente Realidad Virtual. Los componentes que nos permiten lograr la inmersión del usuario en una ambiente de Realidad Virtual son:

#### 1) Animación 3D

La animación 3D transmite al usuario una gran sensación de realismo. Esta sensación de ambiente 3D puede lograrse gracias a una visión 3D real utilizando cámaras adaptadas a tal efecto. También es posible lograr esta sensación con cambios de cámara, que unidos a los cambios de perspectiva de un objeto, nos producen la apariencia 3D. La animación 3D se puede llevar a cabo en: cámaras, personajes y objetos.

#### 2) Visualización 3D

La imagen tridimensional en movimiento no es nueva. Ya en los cines de antaño se proyectaban algunas películas tridimensionales que funcionaban emitiendo dos películas diferentes, cada una con un tinte de color diferente. Al ponernos unas gafas de estos colores (uno en cada ojo), cada ojo veía una parte de la película, dejando "invisible" el otro, por lo que obteníamos una visión estereoscópica, dando la sensación de profundidad. Este método no es cómodo y además es poco efectivo. En la actualidad existen nuevos métodos para lograr la visualización 3D:

- Displays auto estereoscópicos o de paralaje: son pantallas de ordenador similares a las tradicionales, en las que no es necesario el uso de gafas polarizantes o filtros de colores.
- Displays volumétricos: son sistemas que presentan la información en un determinado volumen. Al igual que una pantalla de televisión es capaz de iluminar selectivamente todos y cada uno de los píxeles de su superficie, un *display*

volumétrico es capaz de iluminar todos los píxeles en 3D que componen su volumen.

- Electroholográficos: Estos *displays*, actualmente en fase de investigación, pueden grabar y reproducir las propiedades de las ondas de luz (amplitud, longitud de onda y fase). Este proceso, en caso de realizarse de forma perfecta, sería el ideal para sistemas de visión libre 3D.
- Multiplexado por direccionamiento: Se aplican efectos ópticos como la difracción, refracción, reflexión y oclusión para redirigir la luz emitida por los píxeles de distintas vistas al ojo apropiado. Existen diversos tipos, pero los más destacados (debido a que están más desarrollados tecnológicamente) son los basados en la refracción y en la oclusión.

### 3) Sistemas de Captura de Movimiento

La Captura de movimiento (*Motion Capture*) nos permite obtener un modelo biomecánico 3D computerizado del movimiento humano y analizar los ángulos y aceleraciones de los diferentes segmentos corporales.

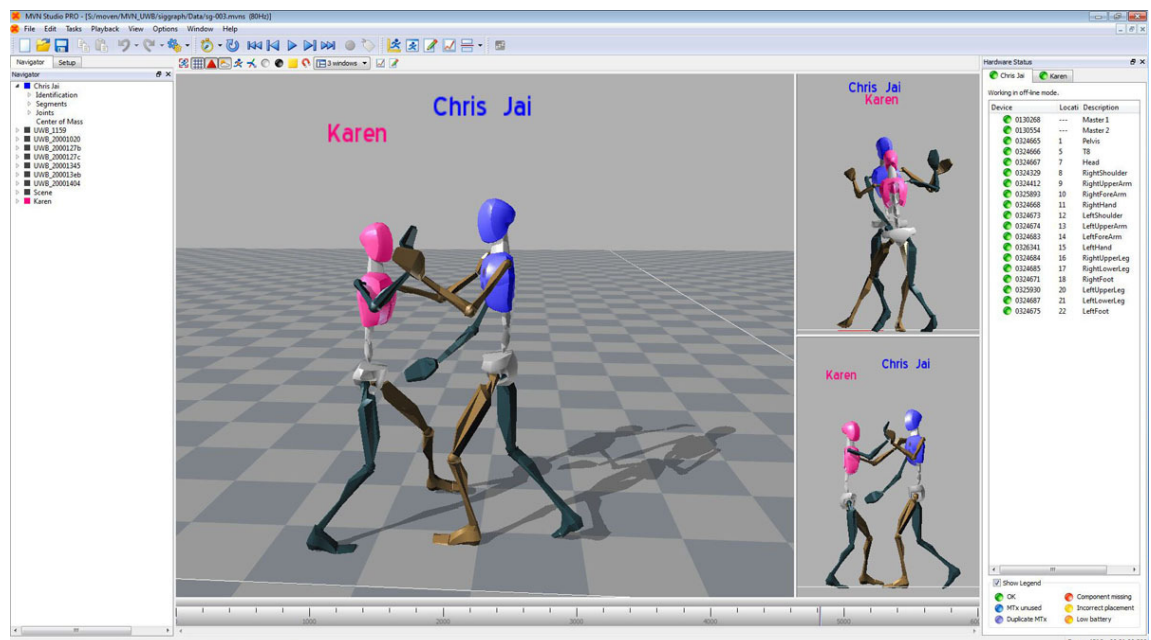


Figura 10: Modelo biomecánico 3D computerizado del movimiento humano.

En consecuencia es posible manipular dicho modelo mediante programas como el que se muestra en la Figura 10. Todo ello



proporciona múltiples campos de aplicación, tanto en el ámbito de la animación virtual, como en la ingeniería o la medicina:

- En la Ingeniería, a través del análisis del movimiento de un sujeto en el puesto de trabajo, evaluamos los posibles riesgos ergonómicos derivados de su actividad. También facilita el diseño y rediseño de su puesto de trabajo.
- En Medicina, lo utilizamos en la valoración de la capacidad funcional de la movilidad del individuo, en el estudio de la marcha y, dentro del campo de la rehabilitación, en la valoración del tratamiento de diversas lesiones.

En la actualidad disponemos de distintas tecnologías y sistemas de captura de movimiento:

- Sistema Move –Human Sensors:

Sistema portátil de captura de movimiento, que utiliza sensores inerciales alojados en una chaqueta instrumentalizada que lleva la persona. Cada sensor se ubica en posiciones predefinidas del cuerpo y nos permite conocer tanto las aceleraciones lineales y velocidades angulares como la orientación de cada una de las partes del cuerpo a las cuales están fijados en cada instante de tiempo.



**Figura 11:** Sistema portátil de captura de movimiento (izquierda) y detalle de un sensor (derecha).

Una de las diferentes configuraciones del sistema portátil (izquierda) y en detalle uno de los sensores utilizados (derecha) como podemos ver en la Figura 11.

- Sistemas Fotogramétricos:

Estos sistemas están basados en métodos ópticos. Utilizan marcadores esféricos reflexivos y cámaras con antorchas de luz infrarroja capaces de recoger la reflexión infrarroja de los marcadores. Es un sistema muy avanzado y nos permite una alta precisión en la captura de movimientos en comparación con los sensores inerciales. Sin embargo, requiere de muchas cámaras lo que dificulta su utilización en exteriores (ver Figura 12), dónde sí es posible la utilización de sensores inerciales.

#### 4) Dispositivos hápticos

Los dispositivos hápticos son dispositivos entrada/salida que sirven como interfaz entre el hombre y la Realidad Virtual. Estos dispositivos permiten al usuario sentir un objeto virtual incorporando el sentido del tacto. Para ello, los hápticos permiten establecer entre el usuario y el entorno virtual una transferencia bidireccional, en tiempo real, de información. Es decir, no solo permiten sentir el objeto sino que también podemos interactuar con él. Además de la sensación de tocar un objeto algunos dispositivos hápticos nos dan la posibilidad de simular la fuerza del contacto.



**Figura 12: Sistema fotogramétrico**



Esto se consigue mediante la aplicación de fuerzas en oposición hacia el usuario. Sin embargo, esto no es una tarea sencilla pues, detrás de todo ello existe un gran trabajo de diseño de algoritmos. Por ello, la creación de dichas fuerzas de reacción representa aún un gran reto matemático e ingenieril. En el siguiente capítulo podemos ver un estudio más detallado de los distintos tipos de dispositivos hápticos existentes y las características más importantes, a tener en cuenta, a la hora de diseñar un dispositivo háptico.





## **4. Tecnología háptica**



La tecnología háptica se refiere al conjunto de interfaces tecnológicos que interaccionan con el ser humano mediante el sentido del tacto. Como se ha comentado en el apartado anterior los dispositivos hápticos son dispositivos de entrada/salida que permiten al usuario mejorar la experiencia con la Realidad Virtual. Esta mejora convierte en muy apropiada la aplicación de estos dispositivos en numerosos campos de la tecnología.

## 4.1 Aplicaciones de la tecnología háptica

Algunos de los principales campos de aplicación de los interfaces hápticos son:

- Teleoperadores y simuladores: Los teleoperadores son operadores que controlan herramientas de forma remota, y para ello es necesario que las fuerzas de contacto resistentes retornen hacia el teleoperador. A esto se le denomina teleoperación háptica. El primer operador háptico desarrollado se construyó en los años 50 en *Argonne National Laboratory* EE. UU por el Doctor *Raymond Goertz*. Este dispositivo permitía operar remotamente sobre sustancias radiactivas. Desde esta experiencia, el empleo de una fuerza de retorno se ha ido empleando ampliamente en muchos otros tipos de tele operación, tal como la exploración de las profundidades marinas. Los simuladores hápticos se emplean en la actualidad en entrenamiento de operaciones médicas y en simuladores de vuelo para el entrenamiento de pilotos.
- Entretenimiento: Algunos dispositivos desarrollados para juegos tienen poseen las mismas características que definen a un dispositivo háptico, como por ejemplo algunos *joysticks* y controladores de juego. La forma más sencilla de lograr esto en los juegos es lo que se denomina "tabletas vibradoras" ("*Rumble packs*") con los que el usuario siente como hay irregularidades, tales como un terreno bacheado cuando conduce un automóvil.
- Medicina: Existen diversos interfaces hápticos en el caso de simulación médica que pueden resultar útiles a la hora de intentar minimizar los daños ocasionados por el uso de procedimientos invasivos (laparoscopia) y permitir operar de forma remota. Actualmente existen médicos expertos que pueden hacer operaciones remotas con robots y utilizando interfaces hápticas (Robot DaVinci).



Además, se han utilizado dispositivos hápticos en rehabilitación asistida por robots.

## 4.2 Ventajas y desventajas del uso de la tecnología háptica

El uso de los dispositivos hápticos en las simulaciones de Realidad Virtual presenta ventajas y desventajas:

- Las ventajas incluyen que la comunicación está centralizada a través del tacto y que el mundo digital puede comportarse como el real. Cuando los objetos puedan ser capturados, manipulados, modificados y reescalados digitalmente, el tiempo de trabajo será reducido. Con herramientas hápticas, el diseñador podrá probar las cosas y sentir los resultados, como si él o ella estuviera manejando el objeto físico.
- Las desventajas incluyen el problema de la depuración de los programas. Esto es muy complicado puesto que implica un análisis de datos en tiempo real. Los enlaces en telemedicina deberían tener 0% de tasa de fallos durante períodos extendidos de tiempo. Además, la precisión del tacto requiere de muchísimos avances en este campo.

Por ello, a pesar de que las ventajas podrían proporcionar grandes avances tecnológicos son principalmente sus desventajas, en el tema de la seguridad, las que han impedido actualmente su implementación en aplicaciones reales.

## 4.3 Clasificación de los dispositivos hápticos

A la hora de seleccionar un interfaz háptico para una determinada aplicación, debemos distinguir. En una primera etapa, que tipo de realimentación deseamos recibir, pudiendo elegir entre:

### 1) Interfaces que proporcionen un *feedback* de fuerza

Los interfaces que proporcionan *feedback* de fuerza aportan datos relacionados con la dureza, peso e inercia del objeto virtual. Los dispositivos de *feedback* de fuerza son:



- Dispositivos Desktop: permiten la interacción puntual con el objeto virtual a través de un terminal, materializado como un lápiz, dedo virtual o un joystick.
- Exoesqueletos: permiten la manipulación diestra, en múltiples puntos de contacto, de objetos virtuales con retorno de fuerza. (Figura 16).

## 2) Interfaces que proporcionen un retorno táctil.

Los interfaces que proporcionan un *feedback* táctil nos permiten adquirir datos tales como la geometría del objeto virtual, su rugosidad y temperatura, entre otros. Los dispositivos que proporcionan *feedback* táctil son:

- Dispositivos Desktop: permiten al usuario sentir o percibir la dureza de una superficie, su rugosidad, seguir contornos lisos, o materiales elásticos en dos dimensiones.
- Guantes: permiten simular con libertad de movimiento el contacto en múltiples puntos con el objeto virtual, individuando su textura, pero no características tales como su peso (Figura 17).

En una segunda etapa, debemos analizar las características técnicas de cada uno de los interfaces comerciales disponibles en el mercado, para seleccionar el más apropiado para nuestro objetivo. En el caso del presente trabajo se pretende diseñar un exoesqueleto con retroalimentación de fuerza que nos permita la manipulación diestra de objetos virtuales.

Las principales especificaciones técnicas que debemos considerar son:

- Número de grados de libertad: Se debe definir previamente la movilidad requerida para el dispositivo, de tal forma que el diseño cuente con el número de grados de libertad necesarios para permitir dicha movilidad.
- Espacio de trabajo: la extensión del volumen dentro del cual el manipulador puede posicionar el elemento terminal.
- Rango de control de fuerza: los niveles máximo y sostenido de fuerza que puede ejercer el dispositivo. Según [1] los dedos de un humano pueden ejercer de 30 a 50 N de fuerza en periodos breves de tiempo y de 4 a 7 N en periodos sostenidos. Para que el confort



del usuario u operador esté dentro de unos niveles de seguridad admisibles, las fuerzas ejercidas por el interfaz deben ser inferiores en un 15% a los valores máximos anteriormente citados.

- Fricción aparente: las pérdidas por fricción en un interfaz háptico deben ser inferiores a la mínima fuerza o par que podamos percibir mientras interactuamos con el entorno virtual, ya que en caso contrario nuestro interfaz dejaría de ser “transparente”, pues no podríamos diferenciar si las fuerzas percibidas por el usuario provienen de la realimentación deseada o de las pérdidas mecánicas del dispositivo en sí. Los valores de fricción aparente deben mantenerse en valores por debajo del 7% de las fuerzas y del 12,7 % de los pares de fuerza aplicados en la interacción con el entorno virtual.
- Rigidez: La rigidez de un interfaz háptico se relaciona íntimamente con la habilidad del mismo para generar restricciones al movimiento del operador dentro del entorno virtual, impidiendo que se penetre dentro de los distintos sólidos virtuales, y permitiendo, de este modo, su inspección y manipulación. La rigidez máxima de un interfaz depende de la fuerza máxima que pueda desarrollar y del mínimo desplazamiento que detecte (N/m). Según [26], en la práctica, un interfaz debe proporcionar una rigidez mínima de 20 N/m. para que el operador pueda recorrer adecuadamente una superficie virtual.
- Inercia aparente: la inercia aparente es la masa mínima percibida por el operador cuando mueve el interfaz háptico a través del espacio libre. En el caso de que la inercia aparente del dispositivo fuese demasiado alta, el operador podría fatigarse en exceso. Un estudio piloto [27] indicaba que son aceptables masas de 50g para operaciones que duren media hora o menos, si bien estudios recientes recomiendan valores cercanos a 100g.
- Back-driveability: con este término se alude a la transparencia del interfaz, en tanto que no debe ejercerse ninguna fuerza sobre la mano del usuario mientras no exista interacción física con el entorno virtual. Esta capacidad del sistema para seguir el movimiento de la mano del usuario rápidamente y sin oposición recibe el nombre de *back-driveability*.



- Rango dinámico: es el ratio entre el máximo valor de salida del actuador frente a la fricción del mecanismo.
- Ancho de banda: el ancho de banda de un dispositivo puede considerarse como una medida de su calidad, ya que cuanto mayor sea éste, menores serán los retardos en la transmisión de información, aumentando la estabilidad general del sistema. Algunas de las variables usadas para caracterizar los interfaces *force feedback* deben utilizarse igualmente para seleccionar a los interfaces con *feedback* táctil, tales como: el espacio de trabajo, los grados de libertad, el peso, o el control del ancho de banda. De hecho, dispositivos con *force feedback* pueden también proporcionar un *feedback* táctil; por ejemplo, el Phantom permite individuar texturas del objeto virtual.

Algunas de las variables usadas para caracterizar los interfaces *force feedback* pueden utilizarse igualmente para seleccionar a los interfaces con *feedback* táctil, tales como: espacio de trabajo, grados de libertad, peso, o control del ancho de banda. De hecho, dispositivos con *force feedback* pueden también proporcionar un *feedback* táctil; por ejemplo, el Phantom permite individuar texturas del objeto virtual.

#### 4.4 Principales dispositivos hápticos comerciales

De entre los modelos de interfaces hápticos comerciales, fuera del ámbito exclusivo de la investigación, podemos destacar los siguientes:

##### 1) *Desktop Con Feedback De Fuerza*

###### PHANTOM Sensable Technologies.

Actualmente se dispone de varios modelos de este interfaz, cuyo número de grados de libertad en posicionamiento varía desde 3 hasta 6, pudiendo recibir *force feedback* a lo largo de todos o algunos de estos grados de libertad. El espacio de trabajo de los distintos modelos varía considerablemente desde los modelos iniciales a los superiores. La fuerza máxima que puede proporcionar es de 22N en el modelo Premium 3.0 y la fuerza sostenida (24h.) es de 3N. Conforme avanzamos hacia modelos superiores, aumenta la inercia de los dispositivos, al tiempo que disminuye su rigidez. El Phantom renueva el estado de sus fuerzas cada milisegundo, y presenta una alta resolución posicional. El modelo actualmente

comercializado, el *IMPULSE ENGINE 2000* (Figura 13), posee 2 grados de libertad y un valor de fuerza máxima de aproximadamente 9 N. Su ancho de banda es de 650 Hz.



**Figura 13: Phamton. Sensable Technologies**

#### *HAPTIC MASTER FCS Control System.*

Consiste en un brazo robótico que puede usarse para simular dinámicamente fuerzas, como display de realidad virtual, y para teleasistencia quirúrgica.



**Figura 14: Haptic Master FCS**

El dispositivo, el cual podemos ver en la Figura 14, representa la fuerza que tenemos que realizar para mover un objeto virtual. En función del peso o dificultada para mover un objeto, la rigidez del brazo robótico variará.

#### *FREEDOM 6S MPB Technologies:*

Posee seis grados de libertad y un nivel de fricción de aproximadamente 0.1 N en cada dirección. La inercia resultante en el extremo varía entre 0.09 y 0.15 Kg. En la Figura 15 podemos la aplicación de este dispositivo en la simulación de unas tijeras.



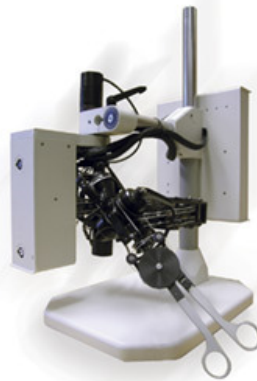


Figura 15: Freedom 6S MPB Technologies

## 2) Exoesqueletos con *feedback* de fuerza.

### CYBERGRASP Immersion Co.

El único guante háptico disponible comercialmente es el *Cybergrasp*, fabricado por *Immersion Co.* El *Cybergrasp* consiste en una estructura exoesquelética fijada a la parte posterior de la mano, que es accionada por unos actuadores instalados fuera de ésta, en una caja de control, con el objetivo de facilitar su manejo aligerando su peso, de aproximadamente 450 gr. La fuerza máxima que puede aplicar sobre cada dedo es de 12N.

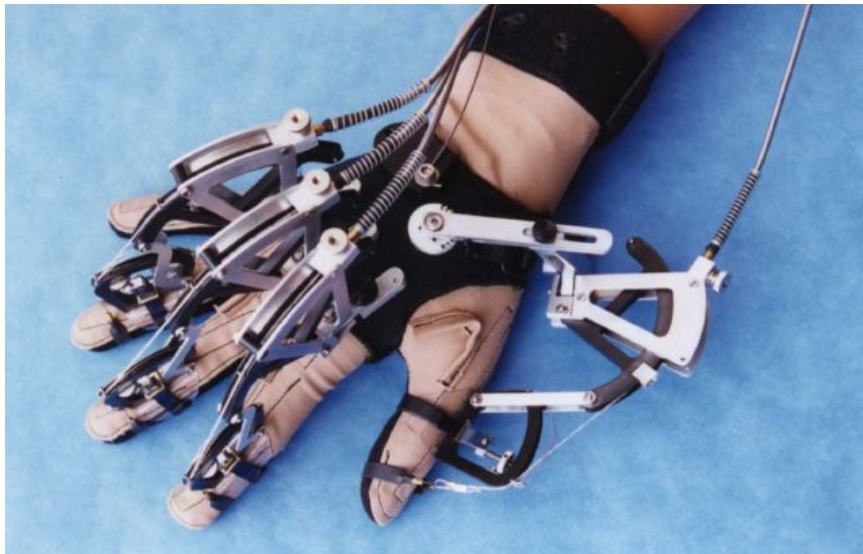


Figura 16: Cybergrasp

En la Figura 16 podemos ver el *Cybergrasp* que en su implementación suele venir acompañado de un guante de datos (*Cyberglove*). Este guante proporciona los datos de posición de la mano.



### 3) Desktop con *feedback* táctil.

A nivel comercial no se ha encontrado ningún ejemplo, si bien, como comentábamos en el punto anterior, un dispositivo con retorno de fuerza como el PHANTOM es capaz de proporcionar *feedback* de tipo táctil.

### 4) Guantes con *feedback* táctil.

#### CYBERTOUCH Inmersión Co.

Estos guantes son mucho más ligeros que los que poseen *force feedback* y emplean normalmente vibradores electromecánicos para proporcionar datos de texturas o rugosidades. La colocación de los actuadores es más simple que en aquellos, lo que facilita su diseño, reduciendo a su vez su coste de producción.



**Figura 17: Cybertouch**

El *Cybertouch* de *Inmersión Co.* pesa solamente 144gr. Usa 6 vibradores electromecánicos situados en la parte posterior de los dedos y en la palma de la mano. Estos actuadores producen vibraciones de 0-125Hz, alcanzando unos 1.2N de fuerza a 125Hz. En la Figura 17 se puede ver el dispositivo (derecha) y una representación de la interacción con el medio virtual que permite este dispositivo (izquierda).

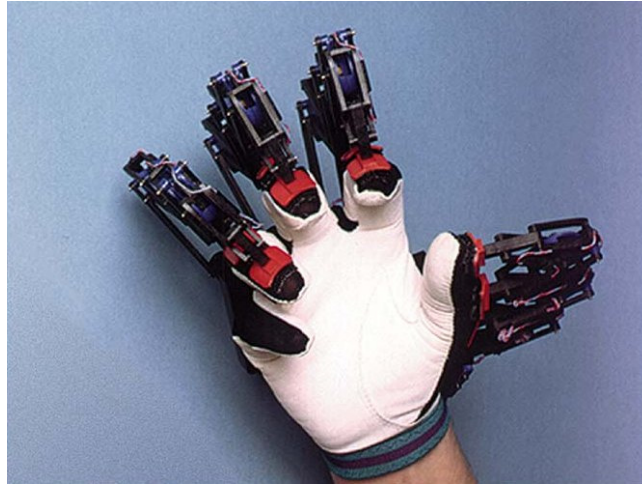


## 4.5. Estado del arte de los dispositivos hápticos

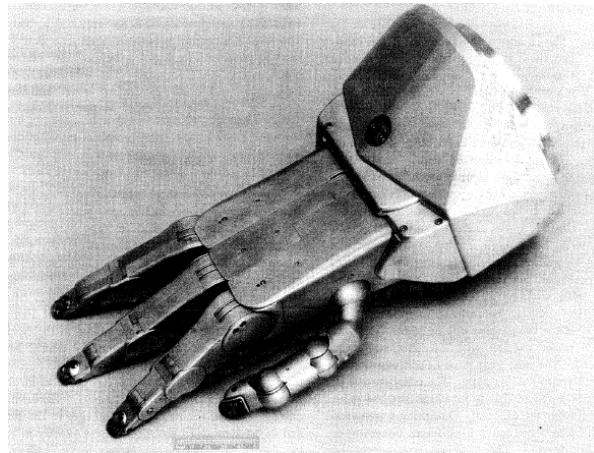
En este apartado se pretende poner de manifiesto los diferentes proyectos que han sido llevados a cabo en el ámbito de la investigación acerca de los dispositivos hápticos basados en exoesqueletos para la mano. También se realizará un análisis crítico de los mismos en términos de funcionamiento, sensores y actuadores que se han utilizado para la implementación de dichos dispositivos. Esto nos dará una visión más amplia de las diferentes tecnologías lo que nos permitirá afrontar nuestro propio prototipo tomando las ideas que consideramos que podrían funcionar adaptándolas a nuestro diseño e ideando nuevas propuestas para mejorar las prestaciones que se han conseguido hasta el día de hoy.

La utilización de exoesqueletos para la mano en conjunto con guantes de datos permite al usuario agarrar y sentir objetos virtuales de una forma mucho más natural. Uno de los primeros ejemplos de dispositivo háptico de tipo exoesqueleto aplicado a la tele operación es el MIT/UTAH *Dextrous Hand Master*, investigación que comenzó en 1986 [7] y [8]. Este dispositivo ha sido desarrollado durante años y una de sus más recientes versiones la podemos ver en la Figura 18. La mano maestra mide el movimiento del pulgar, índice, corazón y anular, mediante un exoesqueleto de fibra de carbono unido a un guante elástico. El exoesqueleto consta de tres pares de mecanismos de barras paralelas que abarcan la longitud de cada dedo y están unidos a una base inmóvil en el dorso de la mano. Se han adherido almohadillas acolchadas a la superficie del guante donde reposan las barras de cada dedo y se conectan los acoplamientos paralelos. La rotación de las almohadillas adyacentes o la rotación de las almohadillas con respecto a la base fija revelan el movimiento angular entre los pares de acoplamientos paralelos y es medido mediante sensores de efecto *Hall*. La abducción-aducción de cada dedo hace girar la serie de mecanismos paralelos sobre el eje perpendicular de la articulación y es medido mediante sensores de efecto *Hall* colocados en la base. La primera mano maestra, creada por [8] en la Universidad de Utah, empleaba un diseño de acoplamiento directo en el exoesqueleto y usaba sensores de efecto *Hall*. Este diseño fue, más tarde, denominado como la EXOS *Dextrous Hand Master*. Este primer diseño presentaba la desventaja de no medir los ángulos de los dedos con precisión porque la cinemática de las uniones del exoesqueleto no casaba con las uniones que lo sujetaban a la mano. Esta imprecisión requería pues, de acoplamientos para el movimiento del exoesqueleto durante la flexión del dedo. El primer diseño dio lecturas que eran sensibles a como había sido colocado el guante debido a la dependencia de la translación de los puntos de unión. Es decir, las lecturas

dependían de la localización exacta de las bandas de unión en cada dedo. Para evitar esta imprecisión, la mano maestra de Utah usa acoplamientos de cuatro barras conectando las articulaciones y mide el ángulo entre las zonas de contacto acolchado con el dedo. Si las almohadillas están bien pegadas al dedo, los ángulos se miden con precisión.



**Figura 18: MIT/UTAH Dextrous Hand Master**



**Figura 19: Mano robótica creada por la Universidad de Utah y que es teleoperada a través de la mano maestra MIT/UTAH DHM.**

Otro de los primeros ejemplos de la utilización de un guante de datos para Realidad Virtual fue el desarrollado en la Universidad de Tsukuba en 1992 [9]. Este dispositivo está basado en un sistema de cables que proporciona hasta 7 N de fuerza realimentada a los dedos índice y pulgar. Los motores están colocados en el dorso de la mano. Su peso es de 250 g y produce al usuario la sensación de fuerza tirando de las puntas de dichos dedos hacia atrás como si tuviera agarrado un objeto virtual.

También en 1992 se llevó a cabo en el *Jet Propulsion Laboratory* del instituto de tecnología de California [17] la investigación acerca de una mano robótica de cuatro dedos y el guante de *feedback* asociado. Tenía como objetivo la teleoperación de la mano robótica (Figura 19) mientras que mediante el guante (Figura 20, figura de la derecha) el usuario pueda sentir todas las fuerzas como si el mismo estuviera sosteniendo el objeto. Como en los dispositivos anteriores, el meñique no está actuado en este sistema ya que su utilización en teleoperación es mínima. El mecanismo está pegado al guante para transmitir las fuerzas a los dedos del usuario. El mecanismo puede ser ajustado para adaptarse al tamaño de cualquier mano, lo que asegura una correcta retroalimentación de las fuerzas, mientras que el guante necesita una posición específica para el correcto funcionamiento del mismo. El guante pesa 1 kg lo que lo hace incomodo de llevar puesto e introduce una sensación innatural de inmersión en el proceso de teleoperación debida a la inercia aparente. Los actuadores están reunidos en una caja con cuatro módulos o cajones. Cada cajón tiene cuatro actuadores y está asignado a uno de los cuatro dedos. Cables flexibles transmiten el movimiento y la potencia desde los cajones hasta el guante.

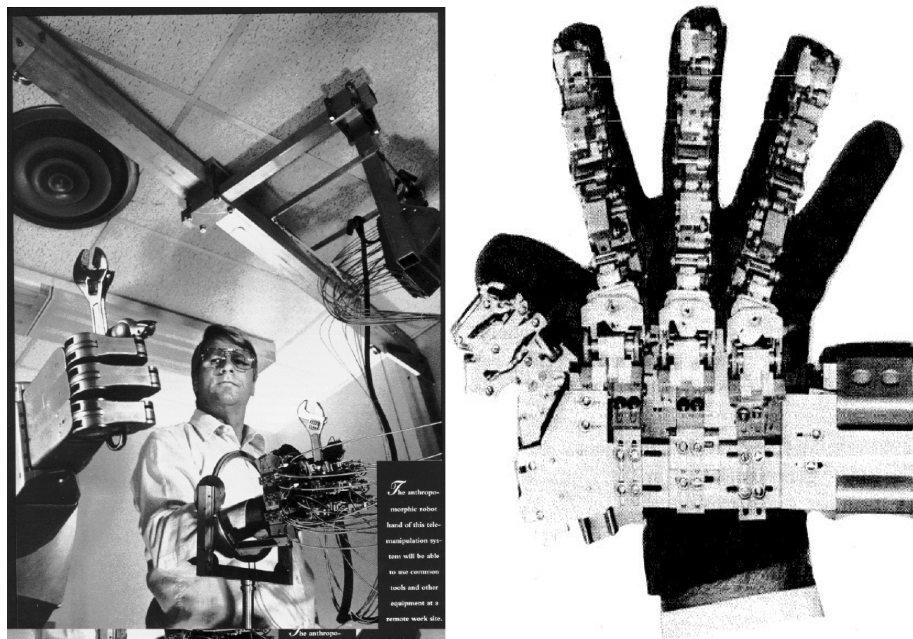
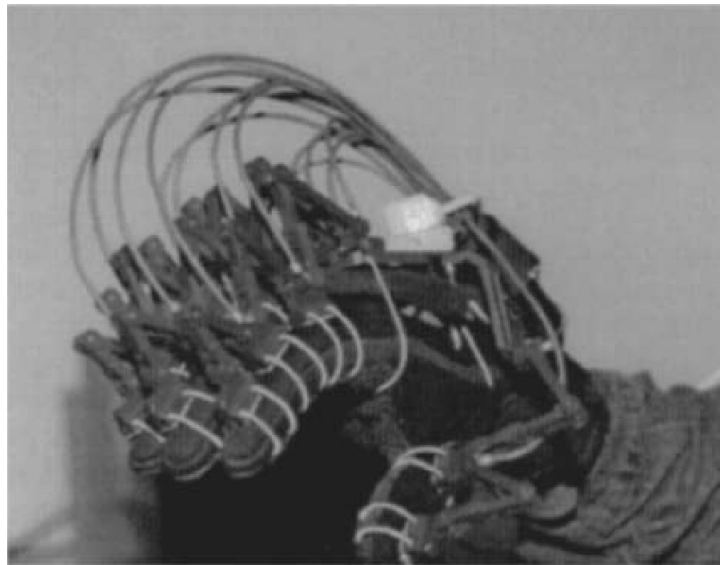


Figura 20: Vista de tele operación (izquierda) y guante (derecha)

El mecanismo tiene 16 articulaciones en los dedos, tres articulaciones en la muñeca y cinco mecanismos pasivos para un total de 24 grados de libertad. Cada uno de las 16 articulaciones mide la fuerza mediante galgas extensiométricas implantadas en el sistema de acoplamiento. Esto permite medidas directas del par aplicado por las articulaciones de los dedos en cada localización.

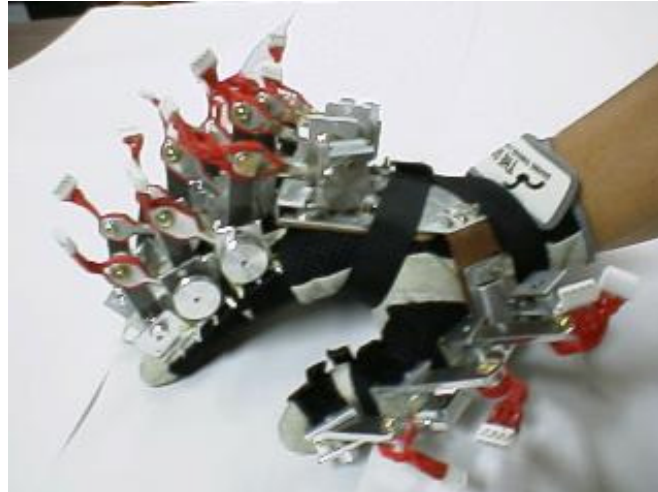


Otro dispositivo basado en un sistema de cables fue la mano maestra del Laboratorio de Robótica de Paris (LRP) [10]. Este diseño proporciona hasta 14 N a todos los dedos. El exoesqueleto, que se puede ver en la Figura 21 transmite las fuerzas desde 14 motores colocados en una caja mediante micro-cables, poleas y cables flexibles. El mecanismo consiste en varios tendones conectados a la parte superior de cada segmento del dedo. Consta de 14 articulaciones (dos del pulgar y tres de cada uno de los dedos restantes) y aplica fuerzas constantes y variables en cada falange. El exoesqueleto consta de tres pares de mecanismos de barras paralelos unidos a una base fija en el dorso de la mano. Cada articulación está actuada mediante una transmisión de tendones que reciben el movimiento de un motor de par colocado en una posición remota respecto de la mano. Los ángulos de las articulaciones del dedo se deducen geométricamente del movimiento del cable, el cual es medido mediante potenciómetros montados en el hueco de los motores. También han colocado sensores de fuerza en la palma para monitorizar la tensión del cable permitiendo el control de fuerza.



**Figura 21: Mano maestra LRP-DHM creada por el laboratorio de robótica de Paris.**

En 1997, se desarrolló el Sensor Glove II (Figura 22) en la universidad de Tokio [11]. El guante tiene 20 grados de libertad, cada articulación está actuada mediante motores y a través de cables flexibles de transmisión para reducir el peso. Los ángulos son medidos mediante encoders rotativos y el par de los dedos de la mano mediante galgas extensiométricas como la tensión de los eslabones. El operador puede interactuar con el simulador de entornos virtuales mediante este dispositivo. También puede ser usado para tele operación.



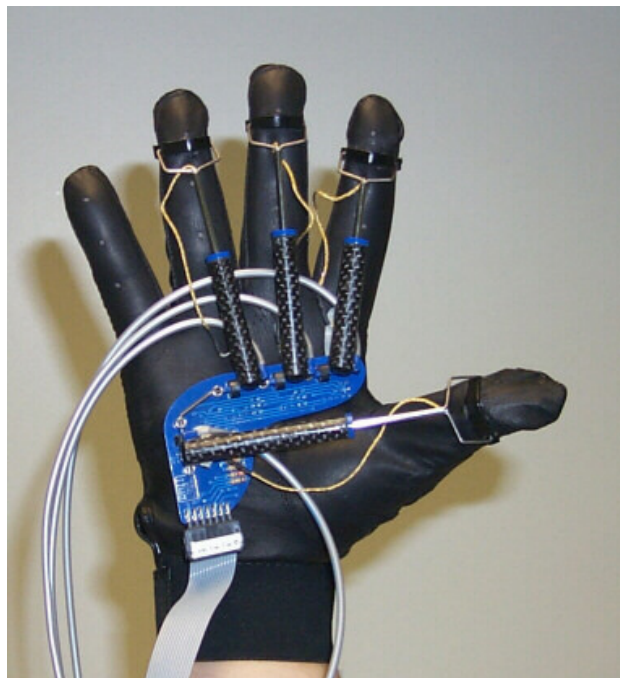
**Figura 22: Sensorglove II desarrollado en la Universidad de Tokyo.**

El Cybergrasp fue introducido por primera vez en 1998 y es, actualmente, el único dispositivo con realimentación de fuerza disponible comercialmente [12]. Se trata de un exoesqueleto, que pesa casi 450 g, montado en el dorso de la mano que es guiado por una serie de tendones hacia la punta de los dedos. El dispositivo puede proporcionar hasta 12 N de fuerza sobre la punta de los dedos. Se utiliza también un PC para dar energía y controlar el dispositivo. Este equipamiento adicional hace su transporte dificultoso ya que la unidad de control pesa 20 Kg. El exoesqueleto no cuenta con sensores de posición ni de flexión y, por lo tanto, requiere de un dispositivo adicional, el *Cyberglove*, para proporcionar dichos sensores. En la Figura 23 podemos ver el *Cybergrasp* integrado con el *Cyberglove*.



**Figura 23: Cybergrasp y cyberglove desarrollados por la compañía Immersion.**

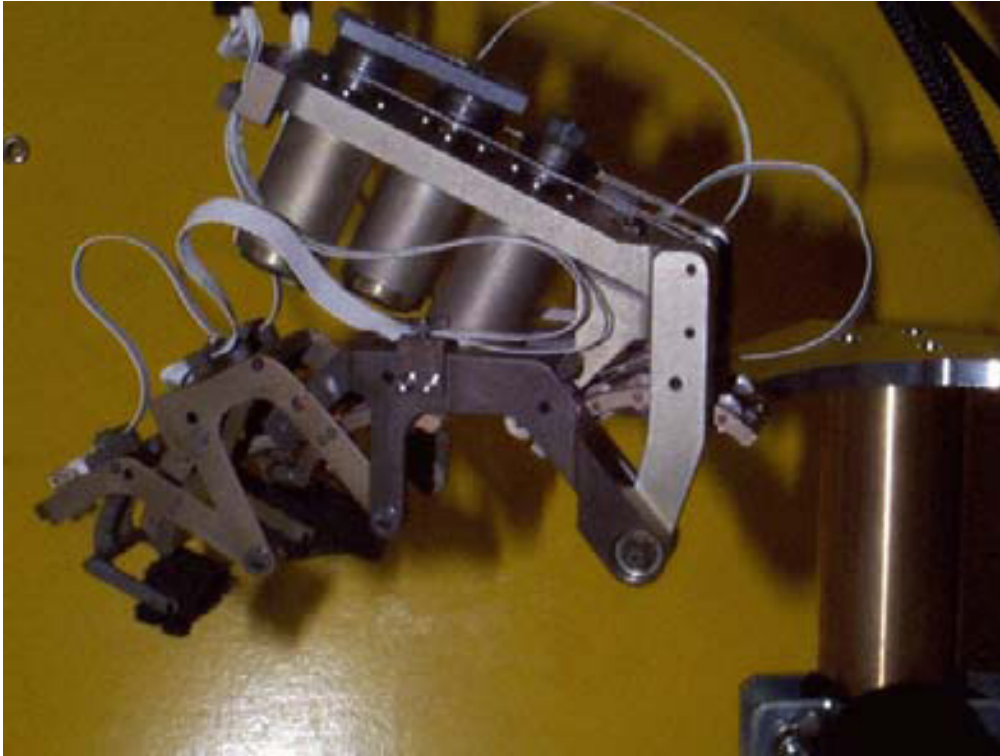
La *Rutgers Master II* fue diseñada en el laboratorio de la Universidad Rutgers (EE.UU.) [13]. Este dispositivo usa un pistón neumático de grafito y vidrio para cada dedo (Figura 24), reduciendo significativamente las fuerzas estáticas cuando el dispositivo no está accionado. Los pistones están unidos directamente a los dedos y están localizados entre la palma de la mano y la punta de los dedos, proporcionando hasta 16 N de fuerza a cada dedo. La parte de trabajo del dispositivo es ligera y cómoda de llevar, ya que pesa solo 100 g. El dispositivo cuenta con una unidad de control que contiene válvulas neumáticas, sensores de presión y toda la electrónica. Se utilizan sensores de efecto *Hall* para detectar el ángulo de los actuadores neumáticos de la palma, y un sensor infrarrojo para detectar la translación del pistón. La posición de la yema de los dedos puede ser determinada basándose en el ángulo y la distancia medidos. Además, se requiere aire comprimido. El principal problema del dispositivo es que al tener los pistones en la palma de la mano, se limita el movimiento de los dedos del usuario.



**Figura 24:** Rutgers Master II diseñada en la universidad Rutgers, EE.UU.

El dispositivo de realimentación de fuerza para la mano de PERCRO [22], es un interfaz háptico antropomórfico (Figura 25) para la replicación de fuerzas durante operaciones de agarre y telemanipulación. Está compuesto de cuatro exoesqueletos independientes sobre cada dedo de la mano, a excepción del meñique. Cada dedo posee tres grados de libertad eléctricamente actuados colocados en correspondencia con los ejes de flexión del dedo humano y un grado de libertad pasivo permite el

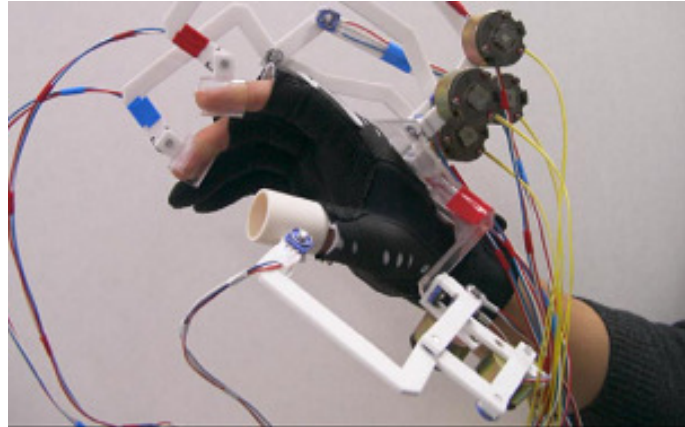
movimiento abducción-aducción. Cada dedo del exoesqueleto tiene tres puntos de unión con el dedo del operador (dos para el pulgar) en el medio de las falanges. Componentes mecánicos garantizan que solo una fuerza perpendicular a los dedos y en su plano sagital es intercambiada en cada punto de unión. Dichos componentes está controlado mediante sensores que controlan activamente la realimentación.



**Figura 25: PERCRO-DHM**

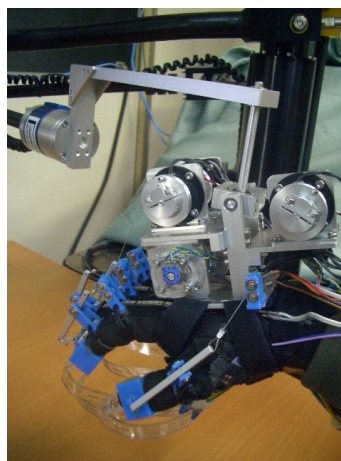
En el 2002 Koyama *et al* diseñaron un dispositivo multidedo basado en realimentación de fuerza usando resortes y discos de transmisión [14]. Este dispositivo resuelve los problemas convencionales de anteriores diseños de manos maestras, como las oscilaciones y estructuras mecánicas complejas. La mano maestra está diseñada con tres dedos (12 grados de libertad). Cada dedo consiste en un mecanismo de paralelogramos articulados sobre cada dedo (Figura 26). El movimiento del mecanismo es restringido mediante el uso de los discos de transmisión. La fuerza que se aplica sobre la punta del dedo del usuario es el resultado de la deflexión en los resortes de dos de las articulaciones en cada mecanismo. La máxima fuerza aplicada es de 3 N basada en el par que pueden transmitir los discos. Usando mecanismos de conexión, el dispositivo mide la posición y ángulo de la punta del índice, corazón y pulgar. Además, permite realimentación pasiva de fuerza. Como resultado, los usuarios son capaces de reconocer la rugosidad de los objetos en un entorno virtual.





**Figura 26: Dispositivo de Koyama**

En 2003 Koyanagi *et al* diseñaron un dispositivo de realimentación de fuerza que utiliza frenos electromagnéticos [15]. Para transmitir la fuerza de frenado diseñaron un sistema de cables y polea. Para mantener la tensión de los cables utilizan un resorte de torsión. Los cuatro frenos están unidos al dorso de la mano. El peso del dispositivo es soportado mediante un robot montado en una mesa como se puede ver en la Figura 27. Para un procedimiento más sencillo de *set-up* el dispositivo cuenta con un guante de trabajo fabricado comercialmente hecho de fibra de poliuretano. Las partes mecánicas están pegadas al guante y reforzadas con velcro. En cada dedo una parte rotativa es colocada entre las articulaciones interfalángica proximal (PIP) y la interfalángica distal (DIP), para que la fuerza aplicada afecte al dedo casi normalmente. También se coloca un rodillo sobre el dedo entre la articulación PIP y la Metacarpiana (MIP) para prevenir que el cable interfiera en el movimiento del dedo y suavice el movimiento del cable. Para medir los ángulos de flexión de los dedos, se han fijado mini potenciómetros a los ejes del freno. Ponerse el dispositivo es relativamente sencillo, sin embargo quitárselo es más difícil porque el guante se fija a la mano debido al alto peso del dispositivo.



**Figura 27: Dispositivo de Koyanagi**

Otro innovador diseño de un dispositivo de realimentación de fuerza aplicado a la teleoperación de una mano robótica fue el diseñado por Sato *et al* [16]. El dispositivo consiste en una serie de dedos mecánicos apoyados en la punta de los dedos que permiten movimiento libre para los dedos del usuario con la ayuda de fotodetectores colocados en el punto de apoyo entre el dedo del usuario y el dedo mecánico (Figura 28). Si la mano virtual no está en contacto con un objeto virtual, los dedos del dispositivo siguen los dedos del usuario sin contacto. Cuando la mano virtual hace contacto con un objeto, el dispositivo empieza a aplicar fuerzas sobre el dedo del usuario. El dispositivo utiliza un motor en cada dedo y cables de transmisión uniando tres articulaciones por cada dedo.

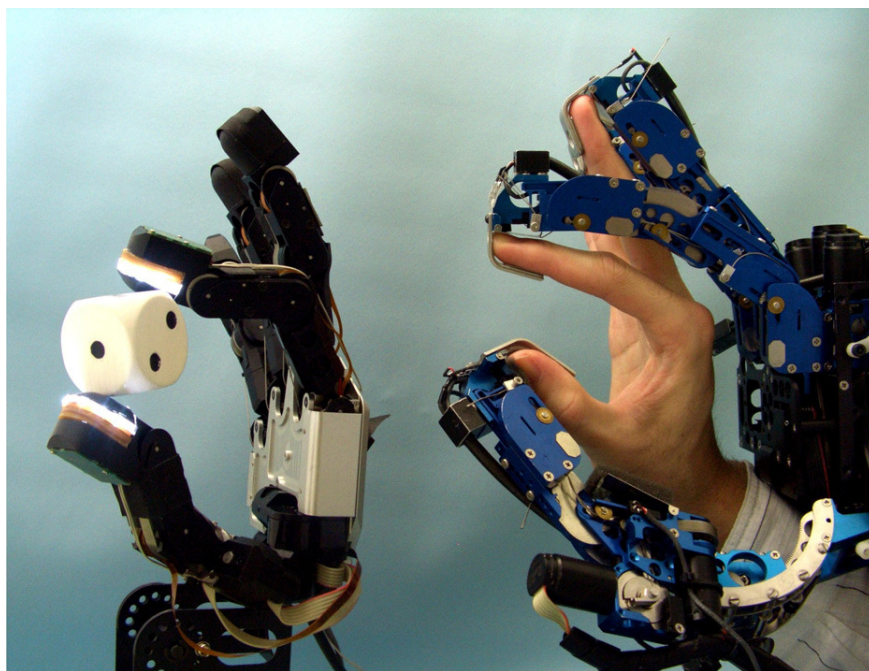
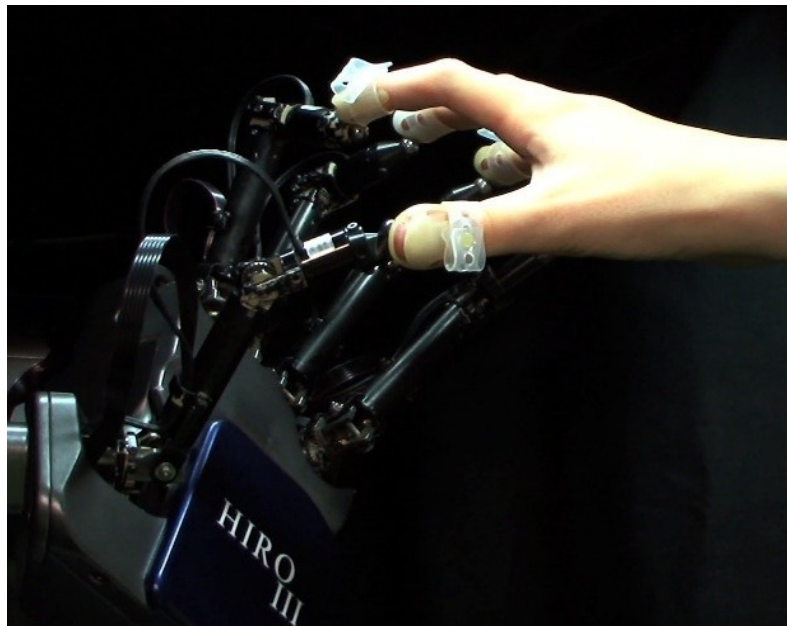


Figura 28: Dispositivo de Sato

En el 2009, los laboratorios de Kawasaki y Mouri en la Universidad de Gifu (Japón) han desarrollado una interfaz táctil que, combinada con pantallas 3D, podría ofrecer una nueva forma de simular el tacto de los objetos. El HIRO III [17] es la continuación de las investigaciones anteriores HIRO [28] y HIRO II [29]. El HIRO III es un robot con interfaz háptica que consiste en una mano robótica de 15 grados de libertad, un brazo robótico de 6 grados de libertad y un sistema de control. El dispositivo puede ser usado en grandes espacios de trabajo y proporciona al usuario contacto multipunto entre este y el entorno virtual. El HIRO III soluciona muchos de los problemas propios de un robot con múltiples grados de libertad: *backlash*, fricción, muchos motores y sensores. La mano háptica (Figura 29), empieza en la muñeca pero no la incluye y termina en la punta del dedo. Cada dedo tiene 3 articulaciones, permitiendo

tres grados de libertad. La primera articulación permite la abducción y la aducción mientras que la segunda permite la flexión y la extensión.



**Figura 29: Hiro III diseñado por los laboratorios de Kawasaki y Mouri en la universidad de Gifu (Japón).**

Todas las articulaciones están actuadas por servomotores de corriente continua con transmisión mediante engranajes y *encoders* de rotación. Para leer las fuerzas cargadas, han desarrollado un sensor de fuerza en los tres ejes instalado en el segundo eslabón de cada dedo.

## 4.6 Conclusiones del estado del arte

Las interfaces hápticas conforman un área de investigación íntimamente relacionada con el campo de la robótica. Los grandes avances registrados en este campo en las últimas décadas han impulsado el desarrollo de dispositivos que mejoran la comunicación hombre-máquina, facilitando la interacción entre ambos mediante la aplicación de sensaciones táctiles.

La interacción háptica es un área de investigación relativamente nueva, dentro de la que varios grupos están desarrollando dispositivos que permiten al usuario la posibilidad de interacción física con un medio virtual o remoto. Los interfaces con *force feedback* se encuentran en un estado bastante avanzado de desarrollo en comparación con los interfaces con retorno táctil, ya que los primeros se vieron beneficiados por los avances realizados en el campo de la teleoperación; queda sin embargo, en ambos casos, un amplio campo por explorar.



Las limitaciones del *hardware* de los interfaces reducen la fidelidad con la que se puede simular la interacción con el mundo real; como por ejemplo: la precisión de los sensores, la capacidad de los actuadores, o la transparencia de la transmisión mecánica empleada.

Otro punto a tener en cuenta es la variabilidad de las características del usuario junto con las características de la interacción del mismo con el interfaz, que pueden cambiar dinámicamente.

La seguridad es otro campo a tener en cuenta en la investigación, ya que debemos salvaguardar la seguridad del técnico ante un mal funcionamiento del computador o del dispositivo.

Otro campo en el que se centran las últimas investigaciones es el desarrollo de una referencia de *software* para *force feedback*, ya que al tiempo que se evoluciona en el *hardware*, se tiene que desarrollar en paralelo un *software*, unos modelos que sepan tratar adecuadamente la computación de las fuerzas así como la generación de las mismas.

En relación a los interfaces táctiles, uno de los principales problemas que abordan los grupos de investigación en este campo es que, en general, estos interfaces proporcionan sensaciones en un área concreta, normalmente en el extremo de los dedos. Debido a esto, se hacen necesarios estudios que identifiquen los tipos de realimentación de tipo táctil para aplicaciones específicas y la tecnología más apropiada para manifestar esta realimentación. Otro problema de los interfaces hápticos táctiles y una prueba de la inmadurez de la tecnología es la ausencia de modelos generales de software que puedan ser usados para determinar las sensaciones que se generan con respecto a la interacción con el entorno, a excepción de las fuerzas de contacto, modelos para los cuales ya existen aplicaciones.



## **5. Requisitos de diseño e implementación del dispositivo háptico**



Después de haber adquirido cierta perspectiva acerca del mundo de los dispositivos hápticos y conocer las ventajas y desventajas de los distintos diseños que se han realizado hasta la fecha podemos sentar las bases de cómo queremos que funcione el dispositivo que se desarrolla en este trabajo. En este apartado se comentan las principales especificaciones del diseño de dicho dispositivo teniendo en cuenta los objetivos del mismo.

## 5.1 Arquitectura general del sistema

El objetivo final del proyecto es el diseño e implementación de un dispositivo háptico que permita a un usuario la interacción realista con los objetos que se encuentren dentro de un escenario virtual. Esta interacción supone que el usuario es capaz de afectar sobre dicho entorno mediante la emulación de las sensaciones de los sentidos del tacto, la vista, el oído, etc.

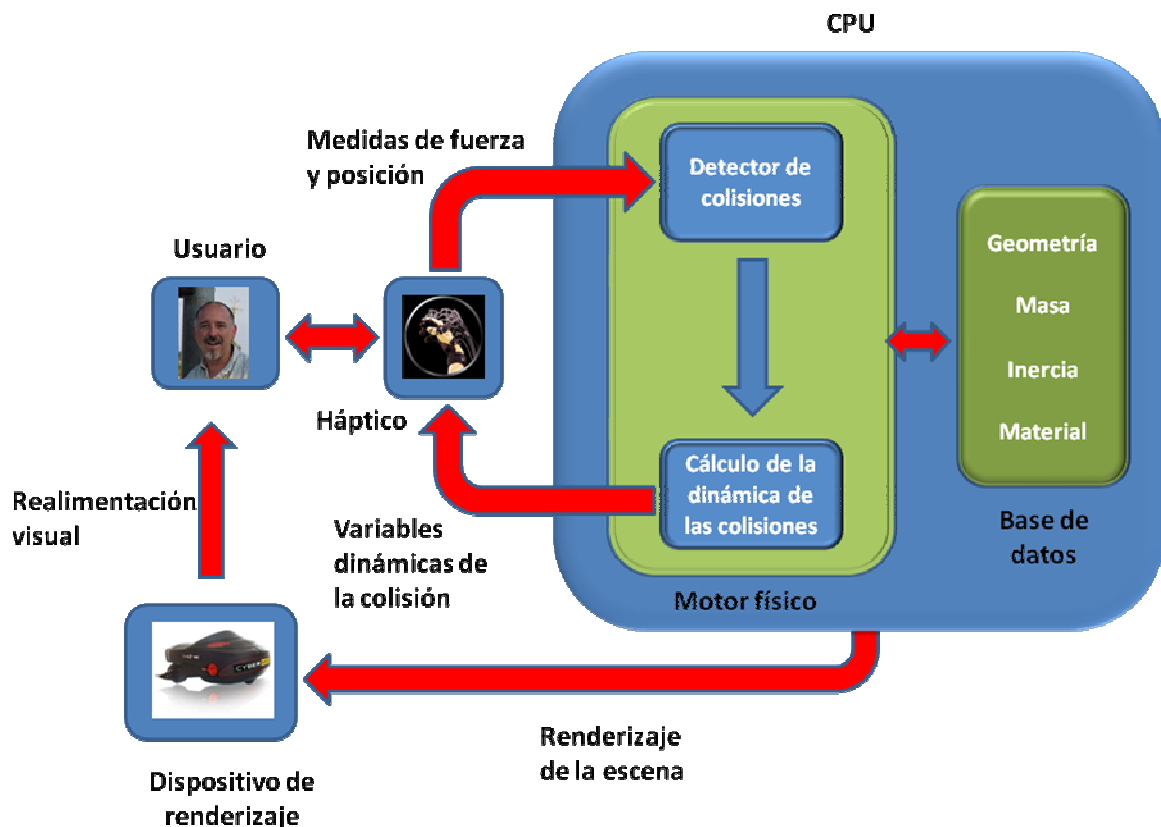


Figura 30: Esquema del sistema háptico.

La arquitectura de un sistema que permita la consecución de este objetivo final es la que se puede ver en la Figura 30. El usuario cuenta con un dispositivo de renderizado, normalmente un casco de realidad virtual que le proporciona realimentación visual del entorno virtual. El usuario también dispone de un exoesqueleto háptico para la mano mediante el cual



interacciona con el entorno virtual. El exoesqueleto capta las posiciones angulares de los dedos de la mano y las transmite a un motor de simulación física. Este motor físico calcula las reacciones de interacción con los objetos virtuales. Además, cuenta con una base de datos, donde se encuentran recogidas las geometrías, las propiedades de los objetos (masa, inercia) y las propiedades de los materiales (textura, elasticidad) de los objetos virtuales que se encuentran en el entorno virtual creado. De este modo combinando estos datos el motor es capaz de calcular la dinámica de la colisión de una forma realista. Una vez realizado esto, el motor envía al exoesqueleto las variables dinámicas mediante los actuadores (Par), el cual crea unas fuerzas de retorno sobre el usuario para recrear la sensación de inmersión en el entorno virtual.

Dentro del proyecto general, este trabajo se centra exclusivamente en la parte del diseño mecánico del exoesqueleto para la mano. Un correcto diseño del dispositivo es fundamental para que las variables dinámicas proporcionadas por el motor físico produzcan mediante el exoesqueleto una fuerza de retorno sobre el usuario que consiga una sensación lo más realista posible.

## **5.2 Estudio de requisitos**

En este apartado se profundizará en el diseño del dispositivo mediante el estudio de los requerimientos necesarios para llegar al mejor diseño en términos de ergonomía, fabricabilidad, precio, fuerza, movilidad y cumplimiento de los objetivos propuestos en este proyecto.

### **5.2.1 Estudio de los grados de libertad**

Es una parte importante a considerar en el diseño de cualquier mecanismo ya que determinará la movilidad del mismo y, por lo tanto, si es capaz, o no, de realizar los movimientos necesarios para llevar a cabo los objetivos para los que ha sido diseñado.

#### Estudio antropométrico de la mano humana

El estudio de la anatomía de la mano humana es muy amplio y complejo, debido a la cantidad de huesos que intervienen en ella. El presente proyecto requiere conocer los aspectos básicos de la estructura anatómica de la mano, así como sus movimientos.



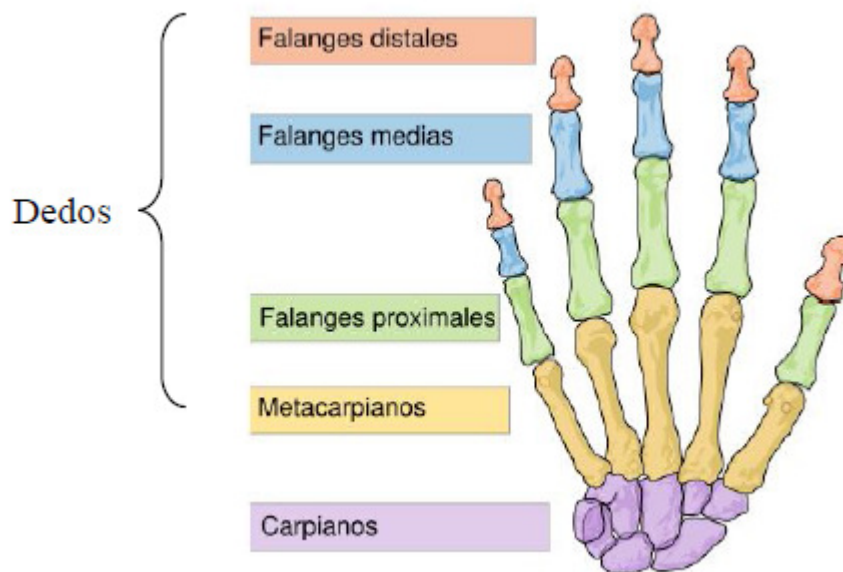


Las manos son dos importantes partes del cuerpo humano, prensiles y con cinco dedos cada una, localizadas en los extremos de los antebrazos. Abarcan desde la muñeca hasta la yema de los dedos en el ser humano. Son el principal órgano para la manipulación física del medio. La punta de los dedos contiene algunas de las zonas con más terminaciones nerviosas del cuerpo humano, son la principal fuente de información táctil sobre el entorno, por eso el sentido del tacto se asocia inmediatamente con las manos.

### 1) Partes de la mano humana

Si englobamos las falanges dentro de los dedos, la mano humana se divide en tres regiones como se ve en la Figura 31 :

- Carpó: Lo forman ocho huesos cortos dispuestos en dos filas superpuestas entre sí. De afuera hacia adentro, la primera fila está constituida por los huesos escafoides, semilunar, piramidal y pisiforme; y la fila inferior, por los huesos trapecio, trapecoide, hueso grande y hueso ganchoso. El carpo se articula por arriba directamente con el radio e indirectamente con el cubito y por abajo, con los cinco metacarpianos. Existen tres cavidades articulares:
  - 1) La articulación más proximal incluye en su interior a la articulación radio cubital distal. A veces hay comunicaciones entre las articulaciones (entre la articulación medio carpiana y la articulación carpo metacarpiana).
  - 2) La articulación del carpo permite un movimiento muy amplio de extensión y flexión. El movimiento ocurre en la articulación antebraquiocarpiana fundamentalmente, que puede girar 90°. Es una articulación troclear en los ungulados y elipsoidea en los carnívoros (permitiendo más movimientos: abducción y aducción).
  - 3) La articulación medio carpiana también es troclear y permite cierto grado de movimiento menor a la anterior (aproximadamente 45°). La articulación carpo metacarpiana es plana, por lo que sólo permite pequeños desplazamientos.



**Figura 31: Partes de la mano humana.**

- Metacarpo: El metacarpo constituye el esqueleto de la región palmar y consta de cinco huesos, denominados metacarpianos numerados del uno al cinco contados desde el pulgar hacia fuera. Los metacarpianos son huesos largos, con un cuerpo y los dos extremos, uno superior o proximal y el otro inferior o distal. El cuerpo es ligeramente curvo en el sentido longitudinal, prismático y triangular, y por consiguiente tiene tres caras y tres bordes. En la extremidad superior o carpiana, los metacarpianos muestran cinco carillas, tres articulares y dos no articulares. La extremidad inferior o digital tiene la forma de una cabeza articular, aplanada en sentido transversal. Se articula con la primera falange de los dedos.
- Dedos: Son cada una de las prolongaciones que se encuentran en la mano. El nombre de los cinco dedos de fuera a dentro, con la palma hacia arriba son los siguientes: Pulgar, también conocido como “dedo gordo”; Índice, Corazón, también conocido como “dedo medio”, “mayor” o “cordial”; Anular y Meñique también conocido como “dedo pequeño”. El esqueleto de los dedos está constituido por las falanges, que pueden ser denominadas de tres maneras: proximal, media y distal; primera, segunda y tercera; y falange, falangina o falangeta.



**Figura 32: Articulaciones del dedo.**

Existen tres falanges en los cuatro últimos dedos, y en el primer dedo o pulgar está ausente la falange media y solo presenta la proximal y distal. Estas falanges se unen mediante articulaciones. El dedo humano está compuesto por tres articulaciones principales (Figura 32):

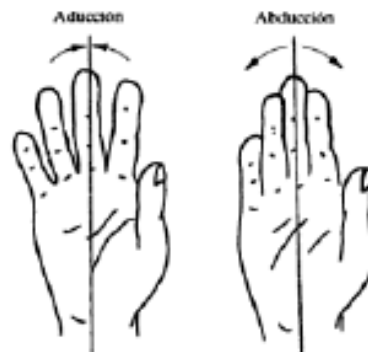
1. Articulación metacarpofalangeal (MCP): Que une la falange metacarpiana y la proximal de un dedo o pulgar.
2. Articulación interfalángica proximal (PIP): localizada entre las falanges media y proximal del dedo.
3. Articulación interfalángica distal (DIP): ubicada entre las falanges media y distal del dedo.

La combinación de todas estas articulaciones son las que permiten a los seres humanos adoptar numerosas posiciones con las manos y los dedos. Posiciones que le permiten el agarre de objetos de múltiples formas y tamaños e impiden que un objeto se le escape de las manos.

## 2) Movimientos de la mano humana

En cuanto a los movimientos de la mano, la articulación de la muñeca tiene dos grados de libertad y soporta la totalidad de cualquier esfuerzo que se realiza con la mano. Los dedos también tienen dos grados de libertad en la articulación con la palma, llamada también articulación metacarpofalangeal, ya que articula la falange

proximal con el hueso metacarpiano. Un grado de libertad corresponde a los movimientos de abducción y aducción (Figura 33). Son movimientos laterales que permiten abrir los dedos, este movimiento es muy limitado. El otro grado de libertad corresponde al movimiento de flexión el cual es muy amplio (Figura 35).



**Figura 33: Movimiento de Abducción-Adducción.**

El pulgar tiene una gran movilidad la cual es clave para el agarre de los objetos. Esta característica del pulgar es algo a tener muy en cuenta a la hora del diseño del dispositivo. Se deberá diseñar una unión específica para el pulgar que permita los 3 g.d.l que posee el dedo más los 2 g.d.l que posee la base del dedo y que permite al pulgar, entre otras cosas, articularse de tal forma que nos permite tocar el meñique con el pulgar como se puede ver en la Figura 34.



**Figura 34: El ser humano puede tocarse el meñique con el pulgar.**



Los otros cuatro dedos se mueven de manera limitada en sentido lateral aunque su capacidad de flexión, para abrir y cerrar la mano es muy buena.

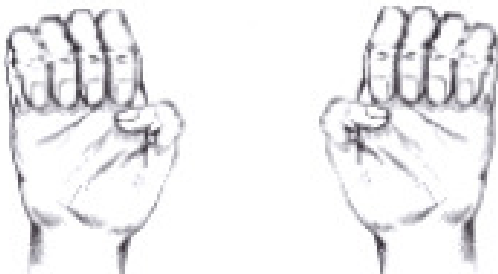


Figura 35: Movimiento de flexión.

Esta capacidad de flexionar los dedos es muy importante para la habilidad de atrapar objetos y mantenerlos con seguridad. Las técnicas de agarre fueron clasificadas por [30], quienes establecieron una clasificación de los numerosos tipos de agarre que se pueden conseguir mediante manipulación diestra (Figura 36). Dicha clasificación es en función de si son de agarres de precisión, intermedios o de fuerza e incluye 33 tipos de agarre.

		Power					Intermediate			Precision				
Opposition Type:	Palm		Pad			Side			Pad				Side	
Virtual Finger 2:	3-5	2-5	2	2-3	2-4	2-5	2	3	3-4	2	2-3	2-4	2-5	3
Thumb Abd.														
Thumb Add.														

Figura 36: Técnicas de agarre (Cutkosky y Howe (1990))

El objetivo de estudiar todos los posibles tipos de agarre es intentar replicar todos o la mayoría de ellos para dar una mayor sensación de realidad durante la utilización del dispositivo. En el diseño del dispositivo deberá existir un compromiso entre el número de agarres a replicar y la complejidad del mecanismo.

Por ello se han elegido aquellos que representan los tipos de agarre más característicos de la tele operación (Figura 37) en aplicaciones de Realidad Virtual. De esta manera, el diseño que se realice será lo suficientemente complejo para conseguir dichos tipos de agarre y lo suficientemente sencillo como para no encarecer demasiado los costes de fabricación.

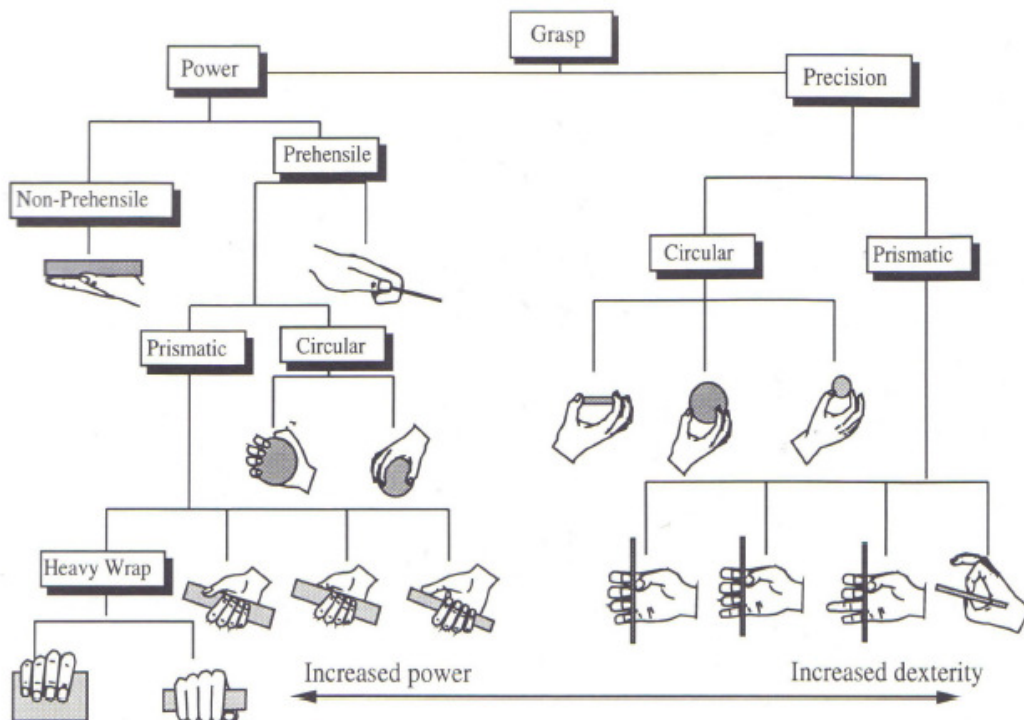


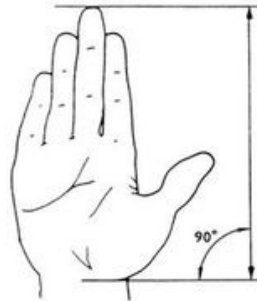
Figura 37: Tipos de agarre característicos de la tele operación.

### 3) Las dimensiones de la mano

Al igual que cualquier parte del cuerpo, la mano está sujeta a las variables antropométricas de los individuos. Por tanto los eslabones, sujeciones, centros de rotación, etc.... han tenido que diseñarse teniendo en cuenta estas variables. Con el objetivo de especificar las dimensiones medias de la mano humana, se describe a continuación como se realizan dichas medidas. Estas dimensiones están recogidas en la norma **UNE EN ISO 7250**.

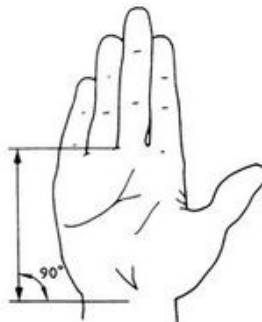


Longitud de la mano: es la distancia perpendicular desde una línea trazada entre las apófisis estiloides hasta la punta del dedo medio (Figura 38).



**Figura 38: Longitud de la mano.**

Longitud de la palma: distancia desde una línea trazada entre las apófisis estiloides hasta el pliegue proximal del dedo medio en la palma de la mano (Figura 39).



**Figura 39: Longitud de la palma.**

Anchura de la mano en los metacarpianos: distancia proyectada entre los metacarpianos radial y cubital al nivel de las cabezas de los metacarpianos desde el segundo al quinto metacarpiano (Figura 40).



**Figura 40: Anchura de la mano en los metacarpianos.**



Longitud del dedo índice: distancia desde la punta del segundo dedo hasta el pliegue proximal en la palma de la mano (Figura 41).



**Figura 41: Longitud del dedo índice.**

Anchura del dedo índice, proximal: distancia máxima entre las superficies medial y lateral del segundo dedo en la región de articulación entre las falanges media y proximal (Figura 42).



**Figura 42: Anchura del dedo índice, proximal.**

Anchura del dedo índice, distal: distancia máxima entre las superficies medial y lateral del segundo dedo en la región de la articulación entre las falanges media y distal (Figura 43).



**Figura 43: Anchura del dedo índice, distal.**



En la siguiente tabla se muestran los valores antropométricos de la mano (en milímetros) tanto para mujeres como para hombres. Concretamente se recogen los percentiles 5, 50 y 95.

	<b>HOMBRES</b>			<b>MUJERES</b>		
<b>DIMENSIONES</b>	<b>Percentiles</b>			<b>Percentiles</b>		
	<b>5</b>	<b>50</b>	<b>95</b>	<b>5</b>	<b>50</b>	<b>95</b>
Longitud de la mano	172	188	204	159	173	188
Longitud de la palma	98	107	116	98	97	105
Anchura de la palma de la mano en los metacarpianos	80	90	99	70	78	86
Longitud del dedo índice	67	73	82	62	68	75
Anchura proximal dedo índice	18	21	23	16	18	21
Anchura distal dedo índice	16	18	21	13	15	18

**Tabla 1: Datos antropométricos para la mano de la población española (Carmona, 1999)**

Para realizar un buen diseño ergonómico, la adaptación tendrá en cuenta el tramo de dimensiones comprendido entre el percentil 5 y 95 de la población.

### Especificaciones de movilidad

El diseño ha sido dirigido a conseguir los 4 grados de libertad que poseen todos los dedos menos el pulgar e índice (poseen 5 grados de libertad: 3 de movimiento del propio dedo y 2 en su articulación con la palma de la mano). Un total de 22 grados de libertad totales correspondientes a la mano completa y que permiten al dispositivo realizar los movimientos necesarios para satisfacer los requerimientos del diseño. Sin embargo el quinto grado de libertad del meñique ha sido eliminado ya que el diseño está orientado a la tele operación, aplicación en la cual el uso del meñique no es estrictamente necesaria. Aunque conservaremos sus otros 4 grados de libertad que aportarán una mayor movilidad que los dispositivos que se han diseñado anteriormente.



En cuanto a los tipos de agarre, para llegar a un compromiso entre tipos de agarre y complejidad del mecanismo diseñado se ha optado por elegir una serie de tipos de agarre representativos que permitan el mayor número de movimientos característicos de la tele operación (Figura 37).

Para la adaptación del dispositivo a un mayor número de personas se realizará la media de las dimensiones que se encuentran entre los percentiles 5 y 95. De esta forma se rechazan valores extremos que podrían hacer que la media no se adaptase bien a la mayoría de medidas y se tendrá en cuenta las medidas del 90% de la población incluida en el estudio antropométrico. Haciendo la media de los datos comprendidos entre percentiles conseguimos diseñar un dispositivo que vale bien para una proporción alta de la población pero que no podrá ser utilizada por aquellas personas dentro de los límites de los percentiles (casos raros).

### **5.2.2 Estudio de peso y tamaño**

Tanto el peso como el tamaño del dispositivo son aspectos cruciales durante el proceso de diseño. En este caso puesto que intentamos crear un dispositivo háptico que ira adherido a la mano deberemos conseguir que tenga el menor peso posible, ya que un peso excesivo podría provocar una sensación antinatural que hace que la sensación de inmersión en la escena virtual sea pequeña. Pero que, a la vez, nos permita su mecanizado para conseguir las formas necesarias propuestas en el diseño.

Para conseguir una reducción de peso ha sido necesario trabajar en dos aspectos: el primero tiene que ver con la optimización de la cinemática del mecanismo y la segunda tiene que ver con la elección del material. Se ha intentado llegar a un compromiso entre este límite de peso y la resistencia del material utilizado para evitar las fracturas durante el uso del dispositivo. Por ello se ha de elegir como material para la implementación del dispositivo un material fácilmente mecanizable y de buena resistencia mecánica.

#### Especificaciones de peso y tamaño

Se ha realizado un estudio con varios usuarios para determinar cuál es el peso a partir del cual comienza a perderse la sensación de inmersión en la escena virtual. En el estudio se ha comprobado que es a partir de 500 g cuando los usuarios reflejaban molestias debido a la fatiga que les producía llevar sobre la mano el dispositivo. Para mantener una resistencia



del mecanismo sin aumentar demasiado el peso del dispositivo hemos dado un espesor **de 3 mm** a los eslabones, espesor suficiente para evitar fracturas inesperadas durante su funcionamiento.

Para calcular el peso que tendrá el dispositivo hemos utilizado el propio *Solid Works*, el cual mediante la introducción de las propiedades física del material nos permite calcular el peso de cada uno de los componentes del dispositivo. La aleación de aluminio utilizada tiene una densidad **2,699 g/cm<sup>3</sup>** al introducirlo en el programa tenemos los pesos de cada uno de los componentes del dispositivo y sumándolos obtenemos un peso total para el dispositivo de **306,1 g** un peso muy competitivo comparado con los otros dispositivos del mercado que ayudará a la comodidad del usuario durante su uso.

### 5.2.3 Ergonomía

La ergonomía es el estudio de una actividad en relación con el entorno en que se lleva a cabo y con quienes lo realizan. Se utiliza para determinar cómo diseñar o adaptar el diseño al usuario a fin de evitar distintos problemas de salud y de aumentar la eficiencia de la misma. En otras palabras, hacer que el diseño se adapte al usuario en lugar de obligar al trabajador a adaptarse a él.

#### Estudio ergonómico

Este estudio trata de resaltar las principales incomodidades que se pueden presentar durante el diseño del dispositivo para luego solventarlas en la propuesta de diseño. Las principales incomodidades durante el uso de un dispositivo háptico de tipo exoesqueleto para la mano son:

- 1) Situar los centros de rotación de dos eslabones sobre los dedos del usuario de tal manera que no interfieran en los movimientos de estos.
- 2) Acoplar dichos centros de rotación unidos al dedo para que el movimiento del dispositivo sea solidario al de la mano.
- 3) Acoplar el dispositivo sobre la mano protegiendo la muñeca de posibles daños y tensiones innecesarias que el funcionamiento del dispositivo pudiera producir sobre ésta.

### Especificaciones ergonómicas

Para evitar todas estas incomodidades se tendrán en cuenta en el diseño las siguientes especificaciones:

- 1) Colocación de soportes acolchados sobre las falanges de los dedos para que la colocación de los centros de rotación no produzca molestias sobre el usuario.
- 2) Utilización de una muñequera que evite cualquier tensión innecesaria sobre la muñeca.
- 3) Utilización de velcro para el acoplamiento de los centros de rotación a los dedos (Figura 44). También se debe tener en cuenta que el grosor del velcro sea tal que no impida el correcto movimiento de los dedos al cerrar la mano ya que las longitudes interiores de los dedos al cerrar la mano se acortan cierta longitud.

#### **5.2.4 Sensores**

Con objeto de controlar adecuadamente el dispositivo es necesario la introducción de una serie de sensores que nos permitan medir los parámetros más importantes del dispositivo. En este caso queremos medir las variables cinemáticas y el par en cada articulación.



**Figura 44: Detalle de la sujeción mediante velcro.**

### Medición de las variables cinemáticas

Para que el dispositivo háptico funcione correctamente es necesario poder medir el ángulo de las articulaciones de los dedos con precisión.

Existen dos formas de conseguir esto:

- 1) Colocar *encoders* en todas las articulaciones del dispositivo háptico. Alrededor de 50 en este concretamente. Esta forma es inviable porque ocuparían demasiado espacio, impidiendo el movimiento de los dedos. Otra desventaja es que el juego mecánico entre dispositivo y el dedo provocaría una imprecisión inaceptable en los datos medidos.
- 2) Utilización de guantes de datos. Su principal ventaja es que no ocupa casi espacio. Además mide el ángulo directamente en la mano evitando las imprecisiones que se daban en los *encoders*. Se puede realizar una calibración personalizada para cada usuario.

Por lo tanto se utilizará esta segunda opción para medir las variables cinemáticas. En concreto, se utilizará un dispositivo comercial, el guante de datos inalámbrico *CyberGlove*, el cual se puede ver en la Figura 45. Este guante cuenta con hasta 22 puntos de articulación de alta precisión, utiliza tecnología de detección de plegado de resistencia para transformar los datos de los movimientos de la mano y dedos en tiempo real.



**Figura 45: Sistema Cyberglove**

Existen dos tipos de configuraciones: el guante de datos de 18 sensores cuenta con dos sensores de plegado en cada dedo, cuatro sensores de captura y de medición, arqueado de la mano, flexión y captura de la muñeca y el guante de 22 sensores tiene tres sensores de flexión en cada dedo y cuatro de captura, arqueado de la mano, flexión y captura de la muñeca. Cada sensor es extremadamente delgado, flexible e indetectable.



El *CyberGlove* está fabricado con tejido elástico para mayor comodidad y una malla en la palma de la mano para ventilación.

### Medición de par en las articulaciones

Para poder realizar un control de fuerza es necesario medir el par ejercido. Para ello, se propone el uso de unos motores específicos que tienen la capacidad de medir dicha fuerza. Sin embargo, es necesario estimar el par en las articulaciones de los dedos. Es muy importante tener en cuenta las pérdidas que se puedan producir en términos de fricción a lo largo del cable *bowden*.

### **5.2.5 Actuadores**

El dispositivo está actuado a través de motores eléctricos que transmiten el movimiento a las articulaciones a través de cables *bowden*. El cable *bowden* es un tipo de cable flexible usado para transmitir fuerza o energía mecánica mediante el movimiento de un cable interior (normalmente de acero) a través de una funda exterior. La utilización de este sistema presenta la ventaja de que permite colocar los actuadores lejos de las articulaciones, lo que reduce considerablemente el peso del dispositivo. Se consigue un movimiento bidireccional gracias al uso de dos cables distintos para cada articulación unidos por una polea en sus extremos. Esto permite usar un solo motor para cada articulación, aunque se produce el destense de los cables comparado con la solución de dos motores por articulación.



**Figura 46: Actuadores Dynamixel AX-18**

Los actuadores elegidos son los **Dynamixel AX-18+** (**Figura 46**). Cada servo tiene la capacidad de controlar su velocidad, posición y tensión. Además de medir la carga soportada y temperatura. También puede funcionar en modo de rotación continua para ruedas. Cada motor está equipado con interruptores. Tan pronto como el interruptor de fin de



carrera es activado o se desconecta el cable del interruptor, el controlador puede detener el movimiento del correspondiente motor. Mediante el uso de un interruptor de emergencia, la alimentación puede ser también interrumpida en cualquier momento. Los actuadores **Dynamixel** te permiten utilizarlos como un actuador con sensores: el programa que se ejecuta en los micro controladores CM-5 o CM-510 o CM-700 puede reaccionar al entorno utilizando la información leída de los sensores del AX-18F. Esta información leída puede ser la posición actual, la corriente consumida, o la variación de la temperatura del servo con la carga aplicada en el mismo, lo que permite control retroalimentado sofisticado controlando el par que soporta cada articulación del robot.

### Características Dynamixel AX-18F:

- Retroalimentación de Posición, Temperatura, carga y tensión de entrada.
- Ratio de reducción: 1:254
- Tamaño: 50 x 32 x 40 mm (Ver planos en Figura 47).
- Peso: 54,5g
- Holding Torque: 18kgf-cm (a 12V, 2,2A)
- Resolución: 0,29°
- Velocidad max: 97 RPM
- Ángulo de operación: 300°
- En modo de 360°, 1024 velocidades configurables

### Dimensiones Dynamixel AX-18F

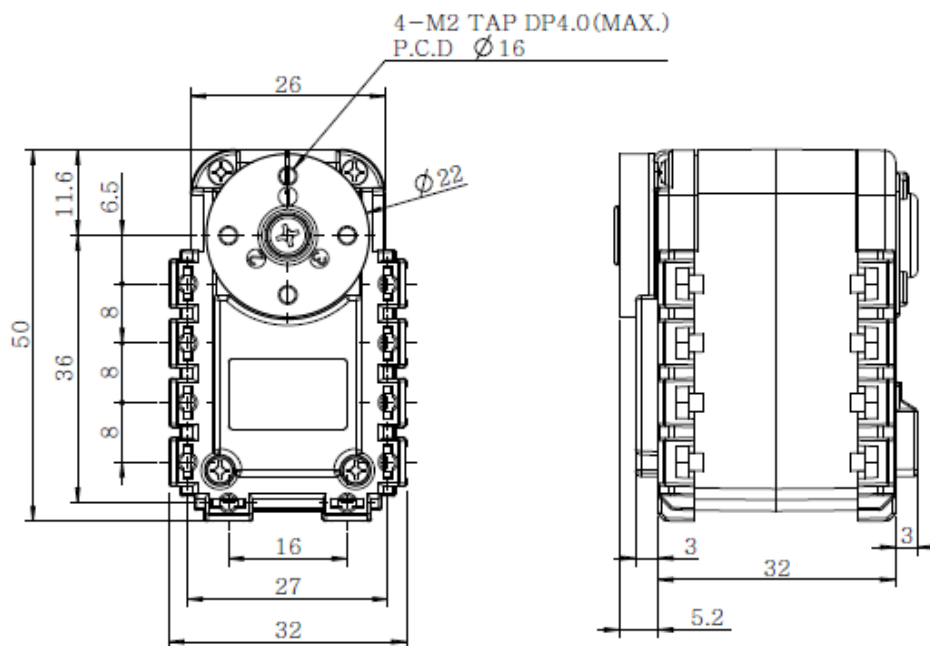


Figura 47: Planos del actuador.



## **6. Propuesta de diseño**

En este apartado se detallará el proceso de diseño del dispositivo háptico explicando las decisiones tomadas en cada momento para cada uno de los componentes del dispositivo. Como en todo proceso de diseño, el método ensayo-error nos conduce a rehacer el diseño una y otra vez intentando mejorar los diseños previos y tratando de adecuarnos a los requisitos que nuestro dispositivo debe cumplir. Para realizar el diseño del dispositivo se ha utilizado el programa de CAD, *Solid Works* en su versión del 2008.

## 6.1 Diseño global del sistema

El dispositivo háptico se compone de un exoesqueleto para la mano, un guante de datos y soporte para los actuadores. El exoesqueleto (Figura 48) está compuesto por tres mecanismos de cuatro barras en todos los dedos menos el pulgar, uno por cada falange, que se apoyan sobre unas bases que permanecen fijas al punto medio de las falanges, a las que llamaremos centros de rotación. El cuadrilátero articulado permite los tres grados de libertad de cada dedo (dos en el caso del pulgar) debidos a la flexión. Mediante la colocación de una polea en el centro de rotación que se encuentra sobre la articulación metacarpiana-falange proximal se consigue los movimientos de abducción-aducción para todos los dedos lo que aporta un nuevo grado de libertad.

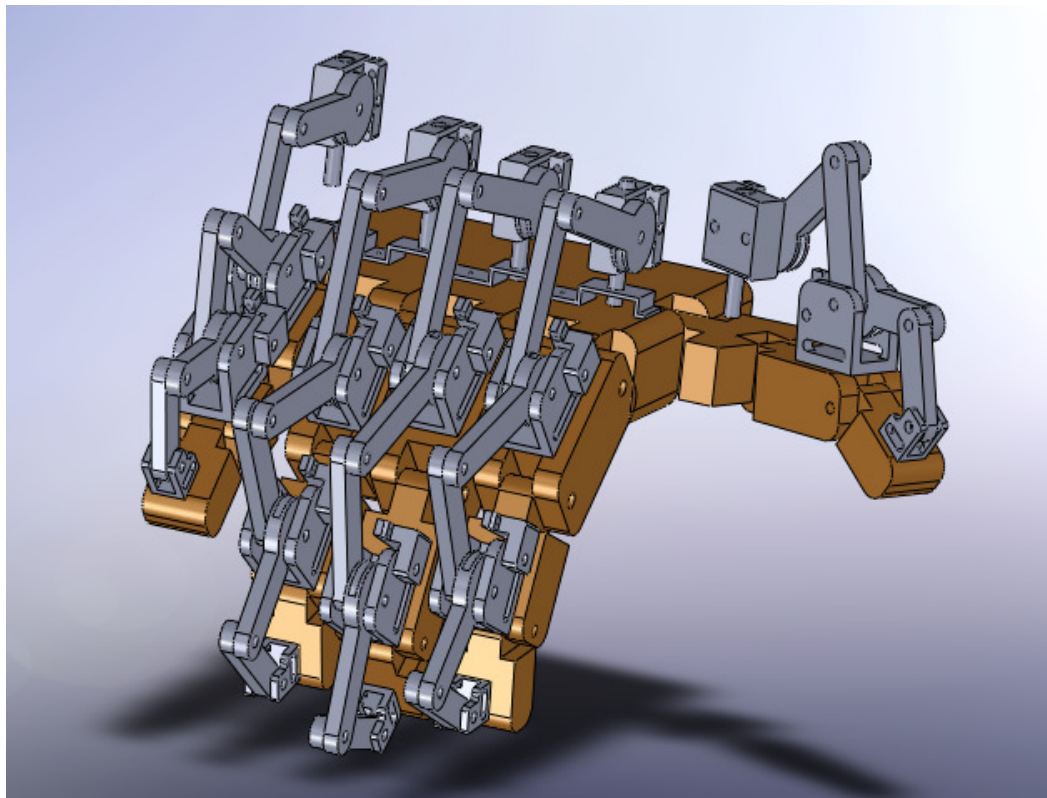


Figura 48: Exoesqueleto montado sobre mano.



En el caso concreto del pulgar, se consigue el arqueo de la palma mediante un sistema de bisagra colocado en el dorso de la mano, lo que aporta un grado de libertad adicional al pulgar. Este mismo arqueo se puede lograr en la zona del meñique pero no se ha tenido en cuenta en este diseño porque estudios anteriores han mostrado que el uso del meñique en tele operación no es imprescindible para el tipo de agarres que se quiere realizar en este proyecto.

El exoesqueleto es actuado por motores eléctricos de corriente continua y la transmisión del par se consigue mediante un sistema de tendones. Cada dedo consta de tres eslabones que hacen las funciones de polea y en uno de sus extremos el diámetro es mayor para garantizar una mayor transmisión de par. A cada uno de estos eslabones llegan dos tendones enganchados uno en cada lateral del eslabón para permitir el movimiento del dispositivo en ambos sentidos. El sistema se completa con la utilización del guante de datos, *Cyberglove*, que permite medir los ángulos de las articulaciones directamente sobre la mano. En la Figura 48 se puede ver exoesqueleto montado sobre una mano.

## 6.2 Componentes

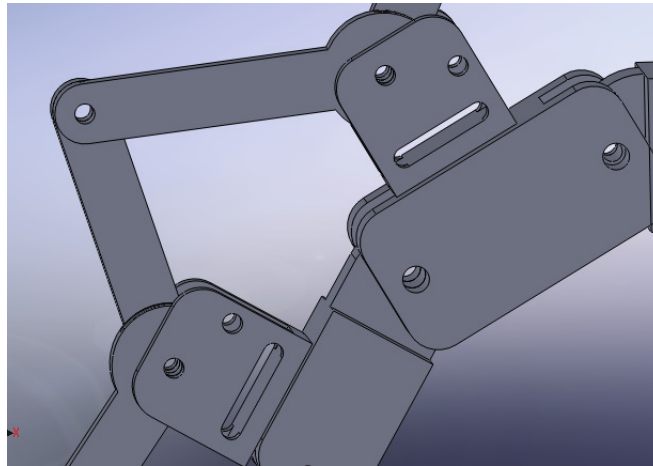
El dispositivo háptico se compone de 28 eslabones de diferentes tamaños en función del dedo de la mano al que pertenezcan, 19 centros de rotación distribuidos en 3 diseños diferentes en función de la articulación en la que estén, 14 soportes para mantener los tendones rectos a la salida de los eslabones de actuación del movimiento de la articulación.

### 6.2.1 Cadena cinemática del mecanismo

Para lograr la inmersión del usuario en el mundo virtual es necesario que el diseño sea capaz de realizar una serie de movimientos que permitan al dispositivo representar fielmente un número de tipos de agarre. Este número de tipos de agarre ha sido elegido mediante un estudio de la taxonomía del agarre humano. Después de haber definido el tipo de agarres que se quieren conseguir con el diseño y basados en la experiencia de otros trabajos previos [14], [20], [21], [22], [23] y [24] se consideró que un sistema de mecanismos de cuatro barras apoyados en el punto medio de las falanges permitirían lograr los objetivos del diseño.

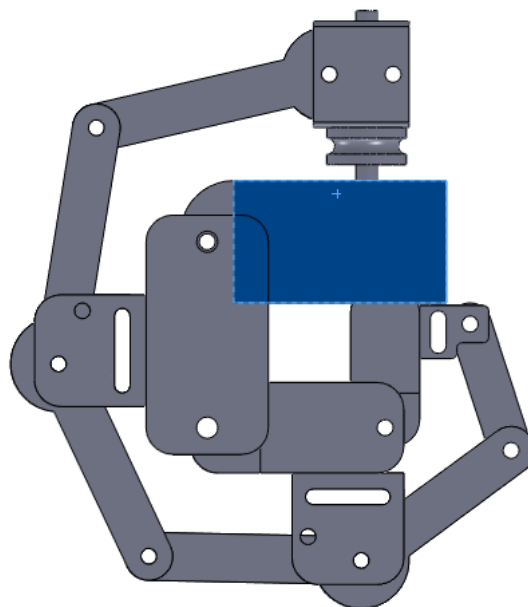
Cada conjunto de dos eslabones, junto con las dos falanges adyacentes a las que afecta, forman el mecanismo de cuatro barras como se

puede ver en la Figura 49. Se ha realizado un estudio cinemático teniendo en cuenta las restricciones y medidas del cuadrilátero para que cuente con movilidad. También teniendo en cuenta que queremos que el dispositivo alcance una movilidad similar a la de una mano humana y a su vez proporcionando el máximo para posible desde los actuadores.



**Figura 49: Mecanismo de cuatro barras.**

Con el estudio cinemático se ha conseguido una primera aproximación y con un estudio dinámico posterior (Capítulo 7) se ha optimizado dicho diseño para obtener el mayor par posible en el mecanismo, aumentando el rendimiento del mismo. El estudio de la geometría de los eslabones ha permitido encontrar las longitudes necesarias para que el mecanismo consiga una movilidad muy similar a la de una mano humana como se puede ver en la Figura 50.



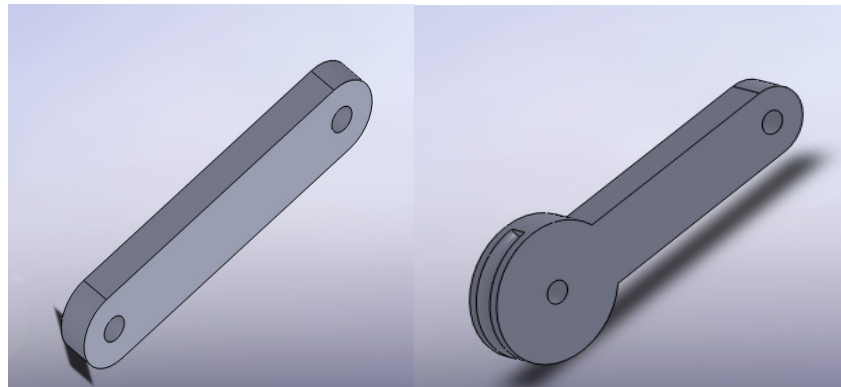
**Figura 50: Detalle de la máxima movilidad que permite el mecanismo al dedo.**

Las longitudes de los eslabones va acorde al dedo en el que estén, siendo mayores las longitudes de los eslabones en el dedo corazón y viceversa en el dedo meñique. También dentro de un mismo dedo, siendo los eslabones de la falange proximal los de más longitud y los de la falange distal los de menor.

Longitud de los eslabones (mm)						
Dedo de la mano						
Falange		Pulgar	Índice	Corazón	Anular	Meñique
	Proximal	35	45	45	45	35
	Intermedia		45	45	45	30
	Distal	25	30	35	30	25

**Tabla 2: Longitud de los eslabones.**

También la forma de los eslabones varía según su función (poleas o levass) Las poleas (**Figura 51**) encargadas de transmitir el par recibido por los tendones tienen un mayor diámetro en el extremo por donde se produzca esta transmisión para poder transmitir el mayor par posible y, a la vez, poder resistir las mayores tensiones que ello conlleva.



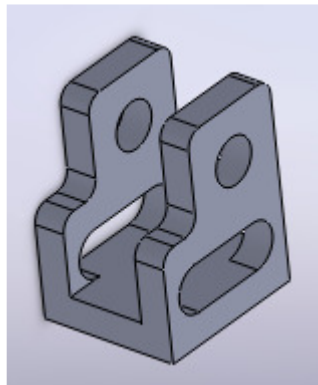
**Figura 51: Levass (Izquierda) y Poleas (Derecha).**

Los eslabones están unidos mediante ejes que transmiten el movimiento. En el diseño de estos ejes se ha considerado una **tolerancia de 0,5 mm** para tener una holgura que puede ser aceptable en la instalación de dichos ejes. Cada dos eslabones tenemos un centro de rotación que, aparte de permitir la rotación de los eslabones, sirve de acoplamiento con el dedo y tiene como accesorio un soporte para que el cable *bowden*. Este soporte está atornillado al mismo centro de rotación y su función es la de mantener



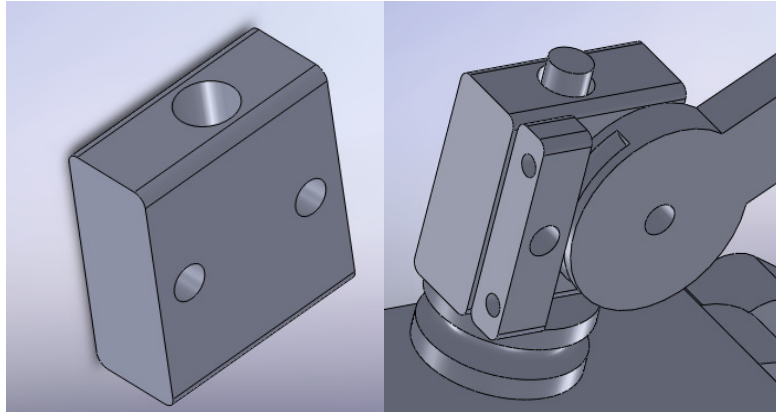
la tensión a la salida de las poleas. Solo cuentan con estos soportes los centros de rotación de las articulaciones que unen las falanges distales con las falanges medias y estas con los metacarpos, así como la que une estos últimos con el carpo. Cada uno de los centros de rotación presenta un diseño diferente:

- 1) Punta del dedo: Presenta un menor tamaño. Se ha buscado la reducción de peso y la adecuación al menor espacio que tenemos en las falanges distales. Como se puede ver en la Figura 52, este centro de rotación cuenta con dos taladros pasantes. Uno donde se coloca un eje sobre el que gira el eslabón y el segundo que sirve para hacer pasar la cinta de velcro que permita su agarre a la dedo.



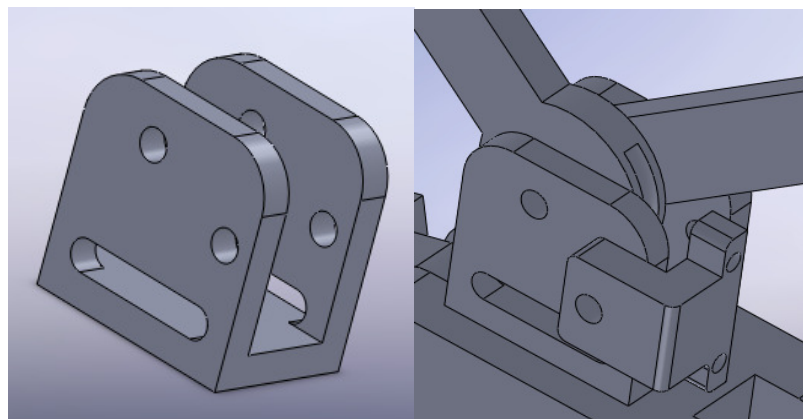
**Figura 52: Punta del dedo.**

- 2) Centro de rotación 1 (entre falange proximal y metacarpo): Es el más diferente por su disposición encima del nudillo. Cuenta con tres taladros pasantes: uno vertical y dos horizontales. El taladro vertical sirve de alojamiento al eje que permite los movimientos de aducción y abducción al dedo. De los dos taladros horizontales, uno es para el eje sobre el que va montado el eslabón y el otro taladro es donde se sujeta el soporte para los tendones. Además su diseño permite una reducción de material a la vez que mantenemos la rigidez de un componente que estará sometido a bastantes tensiones. En la Figura 53 podemos ver el centro de rotación por separado (izquierda) y como parte del mecanismo (derecha).



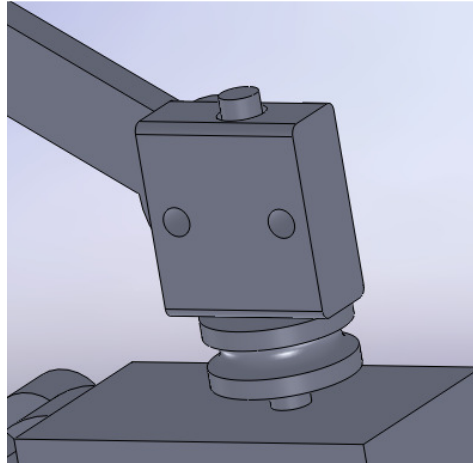
**Figura 53: Centro de rotación 1**

- 3) Centro de rotación 2 y 3 (entre falange proximal y media y entre la falange media y la distal): El centro de rotación 2 (Figura 54) y el centro de rotación 3 son básicamente el mismo ya que por la geometría de la mano es aplicable a ambas articulaciones.



**Figura 54: Centro de rotación 2.**

Se componen de dos agujeros (Figura 55) uno para el eje que permite el movimiento relativo entre eslabones y otro para el soporte del cable *bowden*. Además la utilización de ranuras en el diseño para la utilización de velcro como elemento fijador del mecanismo a la mano nos permitirá ajustar la posición del mecanismo a la mano de tal forma que se consiga la máxima eficiencia del mismo y comodidad para el usuario.

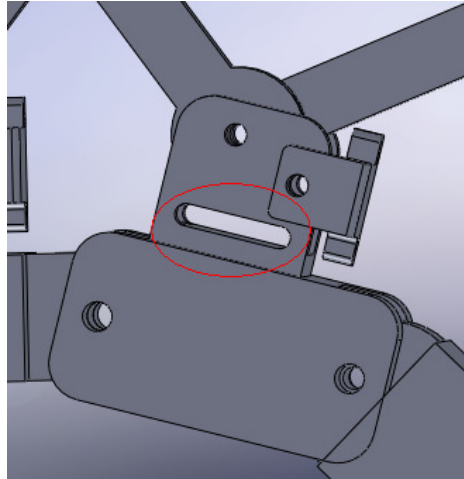


**Figura 55: Vista posterior centro de rotación 2.**

Con este sistema de mecanismos de cuatro barras formado por eslabones hemos conseguido que el movimiento de flexión de los dedos sea posible. Para completar el movimiento del dedo solo nos falta los movimientos de abducción y aducción, el cual conseguiremos con un eje que atraviesa el centro de rotación 1 (Figura 55) al que le transmite el movimiento una polea que se encuentra debajo del centro de rotación y es actuado por los cable *bowden*.

### **6.2.2 Acoplamiento al dedo**

La elección de un incorrecto acoplamiento puede provocar que los cálculos conseguidos para la movilidad no sirvan de nada ya que producirían una pérdida en la eficiencia del mecanismo y errores en la determinación de la posición, velocidad y aceleración por parte de los sensores debidos a que se produciría un juego entre el dispositivo y la mano al moverse. Además de que al estar acoplado a una mano humana debemos tener en cuenta que sea un acoplamiento fácil de colocar y que tenga un diseño ergonómico para no producir ningún malestar al usuario. Con todo ello se ha considerado que un acoplamiento sencillo, fácil de quitar y poner, adaptable a diferentes tamaños de dedos y que cumple los requisitos anteriormente descritos puede ser la cinta de velcro. Para introducir el velcro en nuestro mecanismo, se han diseñado unas pequeñas ranuras en cada centro de rotación (Figura 56) que son los elementos que van fijados al dedo. De esta manera el centro de rotación va colocado encima del dedo y dará igual cual sea el tamaño del dedo pues con este sistema podemos ajustar el velcro para que el dispositivo quede completamente fijado al dedo.

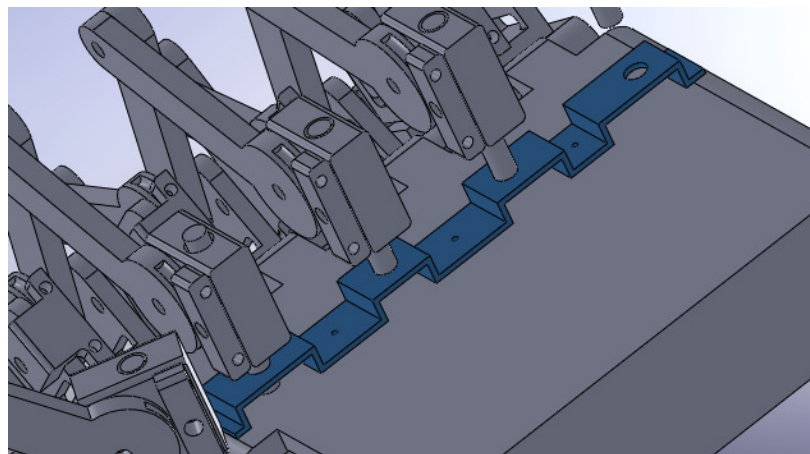


**Figura 56: Detalle de las ranuras.**

Así hemos conseguido la sujeción de todo el mecanismo al dedo y tenemos la fiabilidad de que los datos de posición tomados por los sensores tendrán menores imprecisiones que sin esta sujeción.

### **6.2.3 Acoplamiento a la mano**

El acoplamiento del dispositivo a la mano se realiza por una parte en los dedos mediante la cinta de velcro, que va enrollada a los dedos y a los centros de rotación, y por otra parte gracias al diseño de una pieza (Figura 57) sobre la que se apoyan los ejes que van montados en los centros de rotación que se encuentran sobre los nudillos.



**Figura 57: Detalle pieza de acoplamiento a la mano.**

Debido a que esta pieza no puede ir fijada al guante de datos pues lo dañaríamos, se ha optado por colocar un material termoplástico sobre el dorso de la mano, entre el guante y el dispositivo.

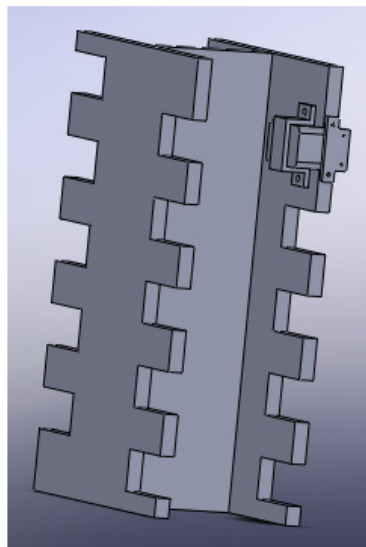


**Figura 58: Material termoplástico.**

Este material viene suministrado en láminas de diferentes tamaños. Son completamente moldeables, colocándolas en agua caliente ( $65^{\circ}\text{C}$ ) pierden la forma que tenían y pueden ser reutilizados una y otra vez. Una vez calentado el material se coloca sobre la mano y éste adquiere la forma de la mano (Figura 58).

#### **6.2.4 Soporte de actuadores**

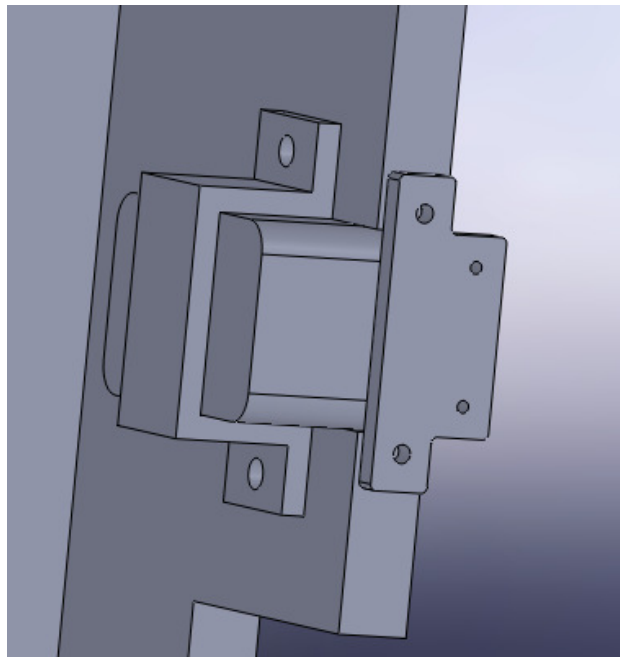
Para conseguir el movimiento de los dedos debemos actuar el mecanismo, para ello hemos necesitado cuatro actuadores por dedo excepto en el caso del pulgar en el que solo hemos necesitado tres actuadores, por lo tanto hemos necesitado de 19 actuadores en total. Como se ha explicado en capítulos anteriores, los actuadores, que transmiten la fuerza a las articulaciones por medio de tendones, han sido colocados fuera del mecanismo. El objetivo de esta disposición ha sido posibilitar la máxima movilidad del exoesqueleto evitando interferencias.



**Figura 59: Soporte de actuadores con un actuador colocado.**

Entonces necesitamos un lugar donde colocar todos estos actuadores y tenerlos fijados para que el proceso de transmisión del movimiento sea posible. Para conseguir esto hemos diseñado un soporte en forma de viga en I, en cuyas paredes laterales se han colocado los actuadores y la pared central es la que da la rigidez al soporte y permite que soporte todas las tensiones que se producirán durante el funcionamiento.

Teniendo en cuenta las medidas del actuador descritas en el apartado 5.1.5 se han diseñado las paredes laterales con huecos donde han sido colocados los actuadores y han sido sujetos mediante unos acoples diseñados a tal efecto como se puede apreciar en la Figura 59. Como también se puede ver en la figura hemos aprovechado ambos lados de las paredes laterales para dar cabida al número de actuadores necesario teniendo en cuenta que no se produzcan interferencias entre los cables *bowden* que salen de cada actuador por lo que los huecos están salteados en ambos extremos de las paredes. Gracias a este eficiente diseño podemos tener reunidos 20 actuadores en el mismo soporte. En la Figura 60 podemos ver un detalle de las sujeciones del actuador y del soporte que mantiene la tensión de los cables *bowden* a la salida de los actuadores.



**Figura 60: Detalle de las sujeciones de los actuadores.**

El soporte que mantiene la tensión de los cables a la salida permite aumentar la eficiencia de la transmisión. Y el sistema de sujeción garantiza la correcta posición de los actuadores y evita que no se muevan mientras su funcionamiento.





### **6.2.5 Propuesta de material para la implementación**

El material propuesto para una primera implementación es el aluminio. Se ha seleccionado el aluminio por su ligereza (densidad =  $2,7 \text{ kg/m}^3$ ), es el metal más ligero, y por su alta conformabilidad, lo que nos permite mecanizar formas complejas aún en piezas de tamaño muy reducido. Además presenta una gran resistencia a la corrosión gracias al óxido de aluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . También presenta una buena rigidez en relación a su peso.

En el futuro se intentará rediseñar el dispositivo en materiales plásticos que permitan reducir el peso. Con esta intención, se han realizado estudios de análisis de elementos finitos que podrían ser reutilizados para tal efecto [Apartado 7.2].



## **7. Simulación y análisis del mecanismo**



Antes de mandar fabricar el mecanismo, la mejor forma de saber cómo se comportaría el diseño es mediante simulaciones por ordenador y el posterior análisis de resultados. Aunque los resultados que obtengamos no serán fiables al 100% si nos darán una visión bastante buena de que puntos del diseño pueden cambiarse para así optimizar el diseño del mecanismo.

## 7.1 Simmechanics

En este apartado se lleva a cabo la parte más importante del diseño, la simulación del mecanismo. Antiguamente, ante la imposibilidad de realizar las simulaciones mediante ordenador, se debían fabricar los modelos para saber cómo funcionaría el nuevo diseño. Gracias a los grandes avances que se han producido en el campo de la informática, ahora tenemos la posibilidad de diseñar y probar dichos diseños sin tener que fabricarlos. Para estudiar el comportamiento cinemático y dinámico del mecanismo, se ha utilizado *Simmechanics*. *Simmechanics* es una extensión de la *toolbox* de *Simulink*, *Simscape*, que cuenta con herramientas de modelado cinemático y dinámico. Se vende comercialmente dentro del paquete de aplicaciones de cálculo, *Matlab*.

El uso de estas herramientas nos permite evitar el complicado trabajo de plantear las ecuaciones necesarias así como de resolverlas. *Simmechanics* es una herramienta de simulación que utiliza diagramas de bloques para representar un modelo complejo compuesto por cuerpos, uniones, restricciones y elementos de fuerza que reflejen la estructura del sistema real. Además, este programa nos permite generar animaciones 3D de nuestro diseño que nos han permitido ver cómo se comporta el mecanismo. A pesar de evitarnos la resolución de ecuaciones muy complicadas, construir un modelo que se asemeje al que queremos diseñar no es algo trivial. La razón principal de la elección de este programa es que nos permite importar nuestro diseño directamente desde el programa CAD (*SolidWorks*) con su masa, inercia, grados de libertad y geometría.

### 7.1.1 Exportar un ensamblaje de SolidWorks a Simmechanics

La simplicidad de este paso es otro de los factores a tener en cuenta para la utilización de este programa. Tan solo deberemos asegurarnos de tener *Matlab* y *SolidWorks* instalados en nuestro PC, y seguir los siguientes pasos:

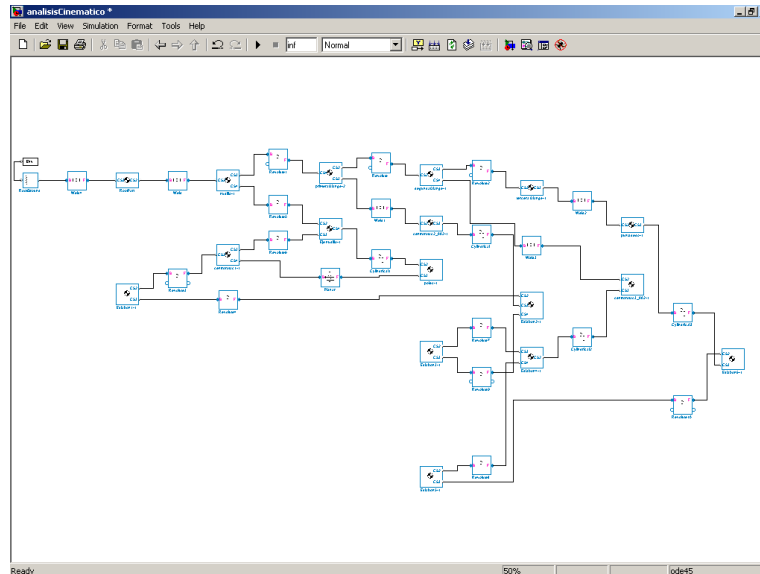


- 1) Lo primero fue acudir a la página oficial de *Matlab* [24] y descargar e instalar el *plugin* compatible con la versión de *Matlab* que teníamos instalada en el PC.
- 2) Después instalamos la utilidad de *Simmechanics* mediante la introducción en la línea de comandos de lo siguiente:  
**install\_addon('<add-on ZIP file name>')**
- 3) Es necesario enlazar la aplicación al programa de CAD (*SolidWorks*). Para ello introducimos en la línea de comandos de Matlab lo siguiente: **smlink\_linksw**. También ha sido necesario instalar el complemento *Simmechanics* link en *SolidWorks*. Esto se ha conseguido en el menú **herramientas** en la opción de **complementos** cliqueamos sobre la opción de **Simmechanics Link**.
- 4) Por último hemos guardado nuestro ensamblaje en formato xml. Para cargar nuestro ensamblaje en *Matlab* hemos tenido que escribir en la ventana de comandos: **mech-import ('filename.xml')**, donde filename.xml es el nombre del archivo, y se ha convertido en un archivo '\*.mdl' que nos permite trabajar dentro del entorno *Simulink*.

Una vez completados todos los pasos, aparece el diagrama de bloques que representa nuestro diseño, como se puede ver en la Figura 61. Este diagrama que nos encontraremos dependerá del número de elementos que compongan nuestro diseño y de las restricciones que le hemos impuesto durante el proceso de diseño en el programa de CAD. Una vez comprobado que todas las relaciones se mantienen correctamente tras la conversión a *Simulink* tenemos la oportunidad de ver una simulación de nuestro mecanismo (Figura 62) si pulsamos en el botón de reproducción (que se representa mediante un triángulo al igual que en los reproductores de video que normalmente vemos a diario) y así podremos visualizar la representación de nuestro diseño. Cuando ejecutamos la simulación vemos que el mecanismo empieza a oscilar como efecto de la gravedad simulada por el programa.

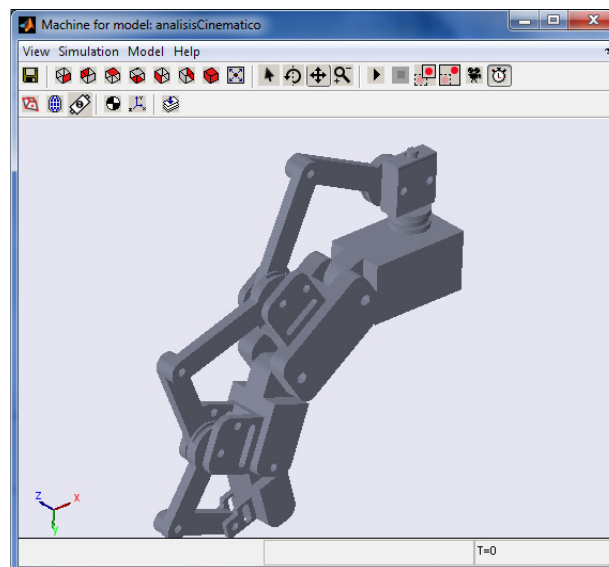
El objetivo último del proyecto es ser capaces de controlar el dispositivo mediante motores conectados al mecanismo mediante tendones. Para que el dispositivo funcione óptimamente ha sido necesario realizar un análisis cinemático y dinámico que permitiera estimar unas longitudes óptimas de los eslabones (optimación cinemática). En este trabajo se han realizado simulaciones con los parámetros originales, dejando la parte de

optimización cinemática para trabajos futuros. Para realizar estos análisis nos valdremos de actuadores, sensores y otros utensilios reales que son simulados por el programa. Estos elementos pueden ser encontrados en la biblioteca de Simscape.



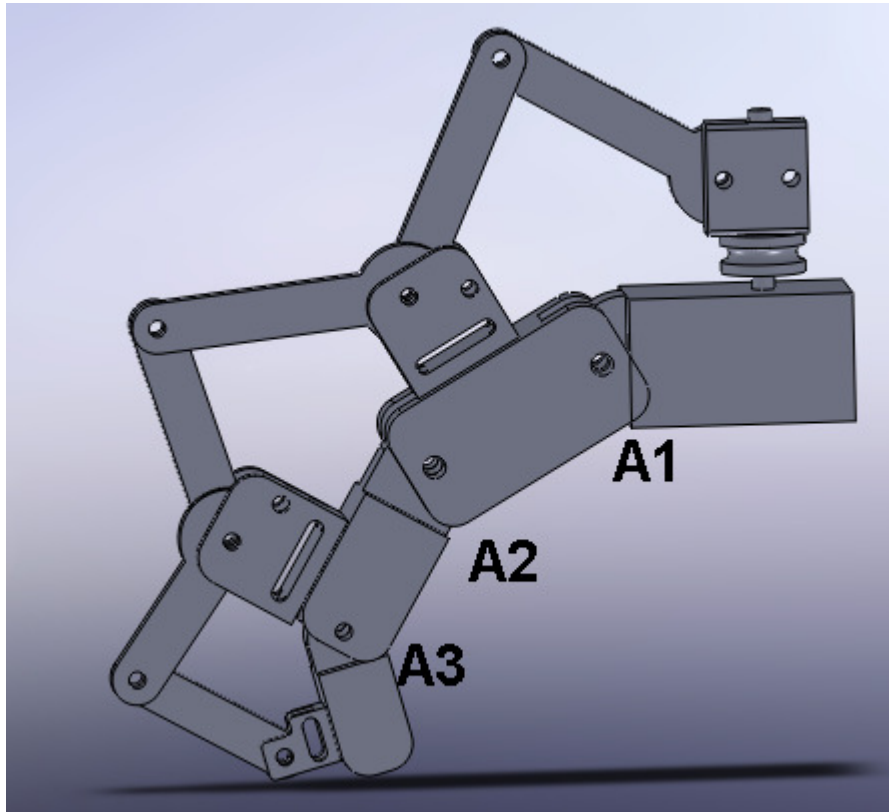
**Figura 61: Diagrama de bloques creado en Simulink**

Para dar más realismo a las simulaciones, que después podremos analizar y obtener conclusiones acerca de la cinemática y dinámica, hemos diseñado un dedo sobre la que situar el mecanismo. Así tendremos la oportunidad de poder ver los esfuerzos que el mecanismo provoca sobre nuestra mano y poder prevenir posibles fallos del mecanismo que provocarían daños en los usuarios, algo que no sería aceptable ya que en todo momento hemos intentado primar los aspectos de la seguridad del dispositivo.



**Figura 62: Simulación del movimiento del dispositivo para un dedo.**

El dedo, que podemos ver en la Figura 63 ha sido diseñado utilizando las medidas extraídas del estudio antropométrico desarrollado en el capítulo 5.2.1 del presente proyecto. Presenta un dedo con todos los grados de libertad de los que uno humano dispondría. Ha sido diseñado al igual que el mecanismo con la herramienta de CAD *SolidWorks*.



**Figura 63:** Nombre de las articulaciones del dedo para el análisis cinemático y dinámico.

El objetivo de estos análisis es determinar la configuración cinemática óptima, una estimación de la longitud de los eslabones y el punto idóneo de anclaje que de los tendones en los eslabones para:

- Obtener una movilidad y precisión lo más similar posible a la mano humana.
- Obtener el máximo par posible en las articulaciones del dedo, lo que nos permitiría mejorar la simulación de contacto virtual con un objeto rígido el cual proporcionaría un par infinito.

Además se pueden añadir restricciones en la movilidad del mecanismo que imposibiliten su movimiento hasta posiciones que una mano humana no pudiera soportar y que de otra forma sólo sería posible conocer al probarlo con un usuario real con los posibles riesgos que eso implica.



Para simplificar y facilitar la comprensión de este apartado, nombraremos a cada articulación de la siguiente manera: A la articulación que une el eslabón 1 con el 2 (A1), la que une el eslabón 3 con el 4 (A2) y la que une el eslabón con el 6 (A3) (Figura 63).

### 7.1.2 Análisis cinemático

En un análisis de la cinemática de un mecanismo la posición, velocidad y aceleración de todos los eslabones se calculan sin tener en cuenta las fuerzas que causan este movimiento. Por ello, este test consistirá en producir el movimiento real que haría la mano y ver cómo se comporta el mecanismo en términos de velocidad y aceleración.

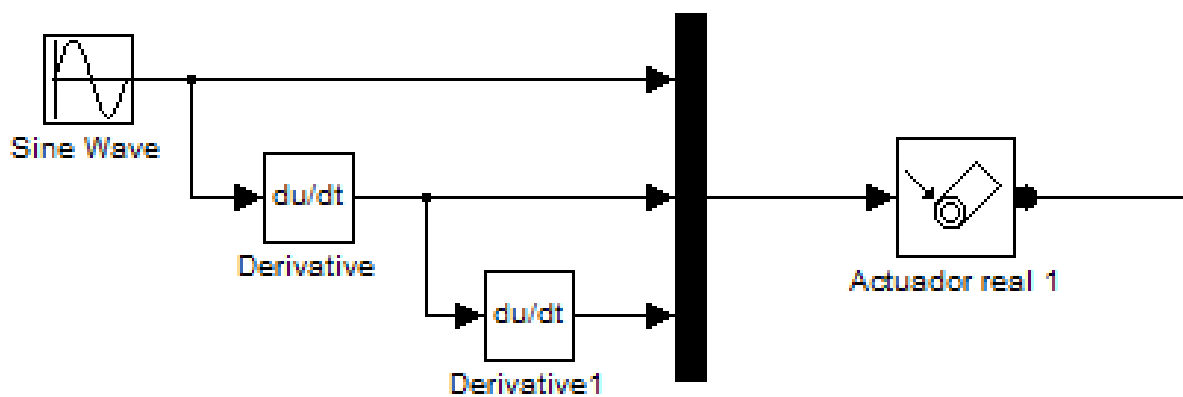
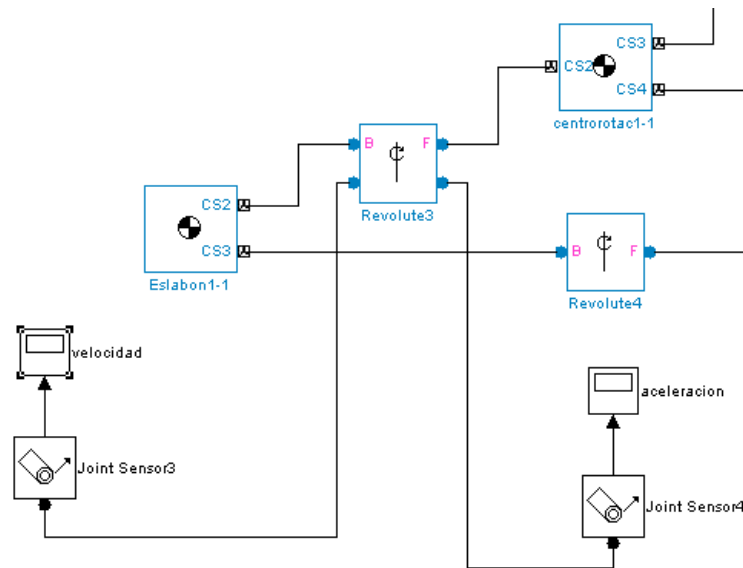


Figura 64: Función sinusoidal en Simmechanics.

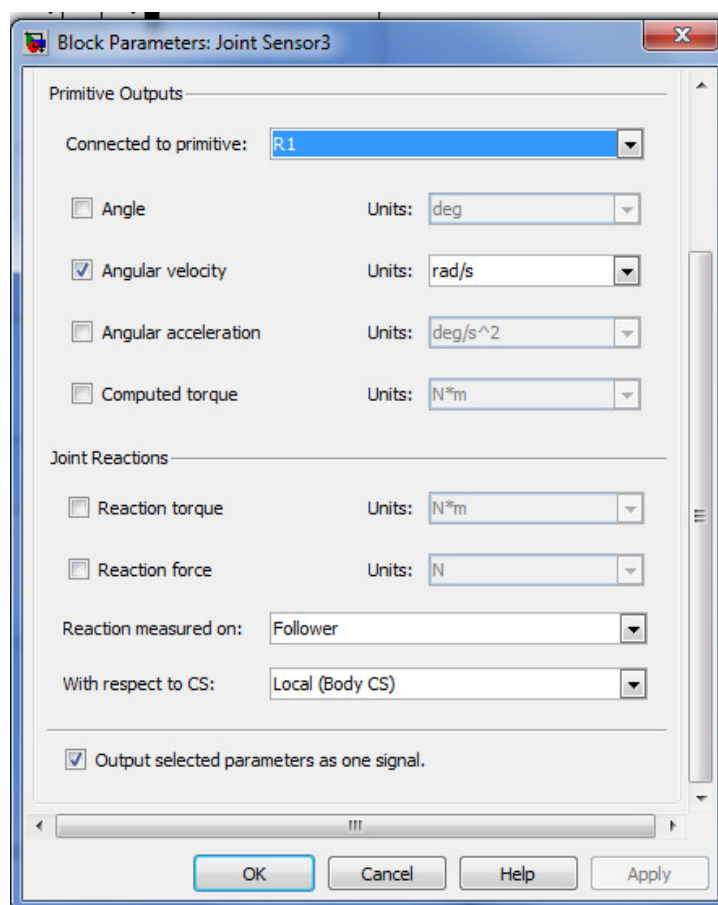
Para reproducir el movimiento de la mano hemos conectado actuadores a las articulaciones del dedo que reproducen una onda sinusoidal (Figura 64) de una frecuencia y amplitud equivalente a la máxima que se pueden necesitar en tareas de manipulación (0,5 Hz). De esta manera el dedo se moverá con un movimiento periódico continuo y nos permitirá analizar el movimiento del mecanismo mediante la trayectoria que seguirán algunos puntos importantes del mecanismo.

Para determinar el punto más interesante de anclaje de los tendones en los eslabones para futuras optimizaciones de la velocidad y aceleración hemos conectado sensores en dichos puntos (Figura 65).



**Figura 65: Esquema de conexión de los sensores.**

Abrimos el cuadro de dialogo (Figura 66) correspondiente a la velocidad y aceleración y configuramos los parámetros que queremos medir y las unidades en las que los mediremos en este caso hemos elegido rad/s para la velocidad angular y  $\text{rad/s}^2$  para la aceleración angular.



**Figura 66: Cuadro de diálogo de los sensores.**

Para que el movimiento periódico sea un movimiento realista y no lleve nuestro mecanismo hasta posiciones que un dedo real no puede conseguir hemos introducido un offset. El offset sitúa el punto intermedio del movimiento y configura la amplitud del mismo. Para introducir los parámetros del offset hemos clicado en el cuadro de diálogo de la función seno (Figura 67).

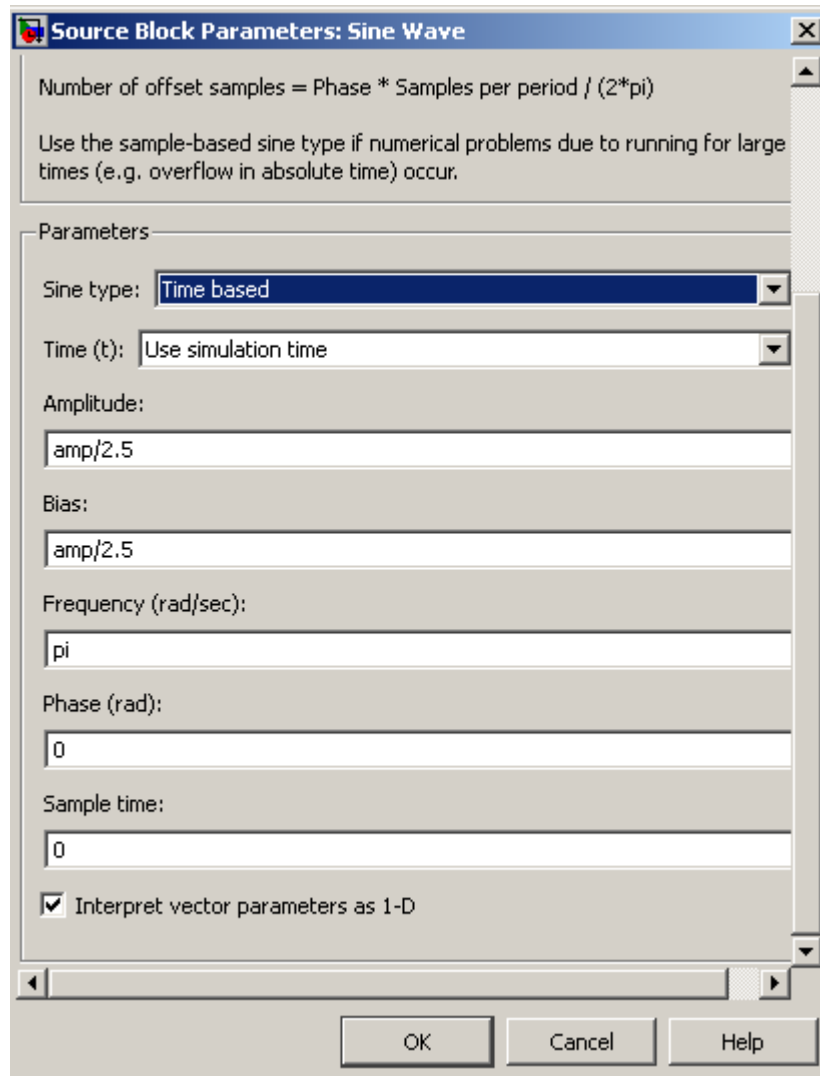


Figura 67: Cuadro de diálogo de la función sinusoidal.

En los parámetros *Amplitude* y *Bias* se ha utilizado una variable de nombre 'amp' para realizar un análisis iterativo que nos ha permitido conocer el comportamiento del mecanismo durante su movimiento. Para el estudio final se ha considerado un valor de 'amp' igual a  $\pi/2$  o  $90^\circ$  ya que todas las articulaciones del dedo humano giran aproximadamente  $90^\circ$  desde su posición inicial de dedo recto. Por lo que la aproximación de  $90^\circ$  es bastante acertada y nos ha permitido conocer el comportamiento cinemático del mecanismo.

Una vez realizado las configuraciones pertinentes, ponemos en marcha la simulación pulsando el botón de reproducir en el menú de simulación (Figura 68). Con los resultados podremos obtener conclusiones acerca del comportamiento cinemático del mecanismo y ver si se produce algún tipo de fallo durante su funcionamiento que pueda afectar a la fiabilidad del mismo.

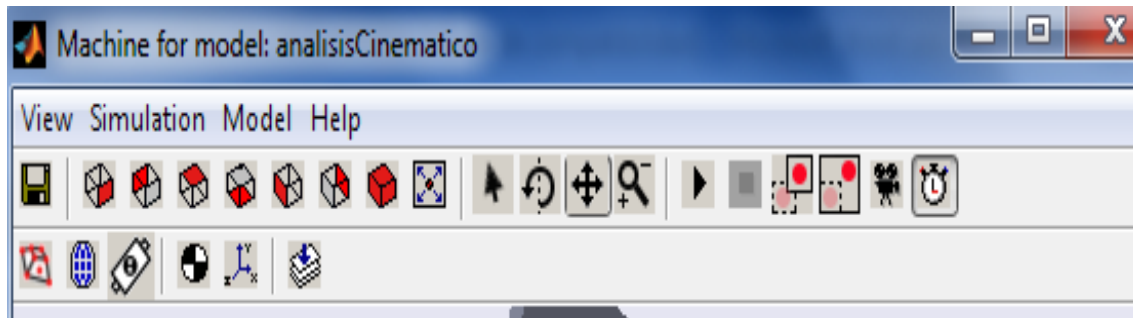


Figura 68: Barra de herramientas del menú de simulación.

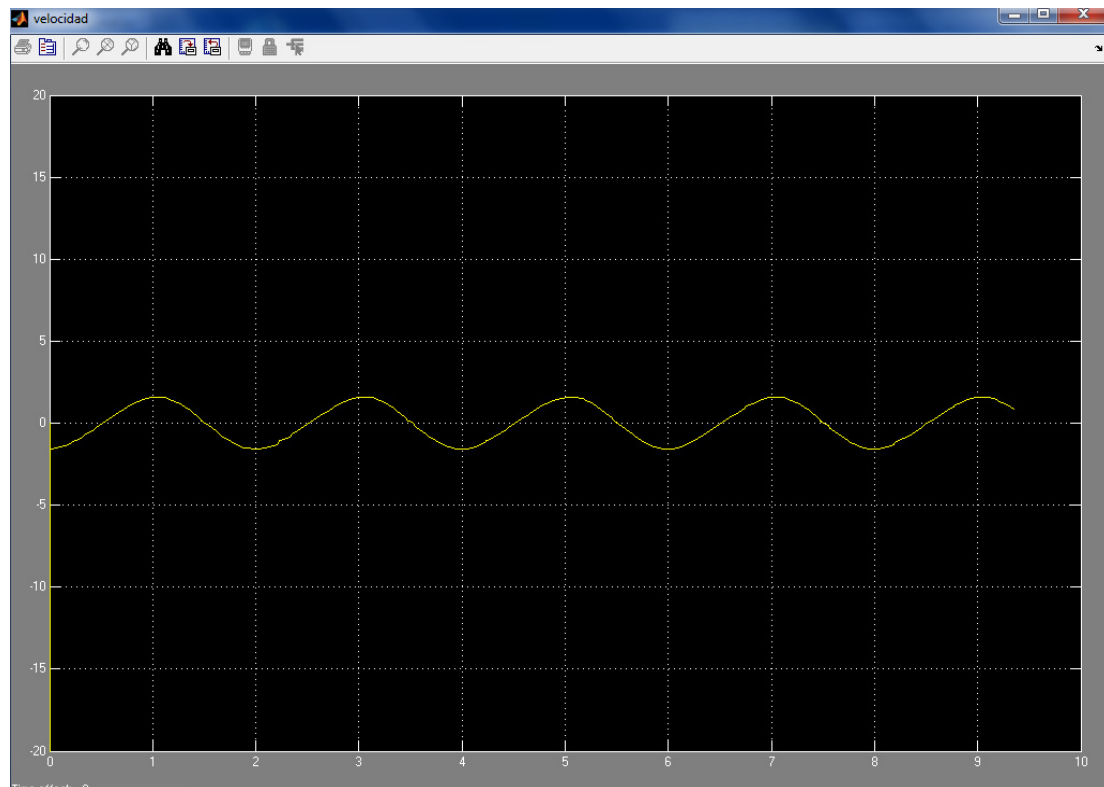
## Resultados del análisis cinemático

En este apartado analizaremos los resultados que hemos obtenido del programa en forma de gráficas y sacaremos las conclusiones pertinentes que darán lugar a cambios en el diseño para su futura optimización o comprobarán la validez de nuestras hipótesis previas acerca de la longitud de los eslabones.

Para realizar los análisis se ha utilizado comandos de posición en forma de seno (Figura 64). El objetivo es comprobar si existen no-linealidades importantes que puedan afectar al mecanismo. Generalmente, los más importantes a tener en cuenta son cambios bruscos en las aceleraciones provocados por sobre aceleraciones fuertes. La razón de utilizar un seno es que tanto la velocidad como la aceleración y demás derivadas son senoidales. Así resulta más fácil de analizar a simple vista las no linealidades en todo el rango de movimiento.

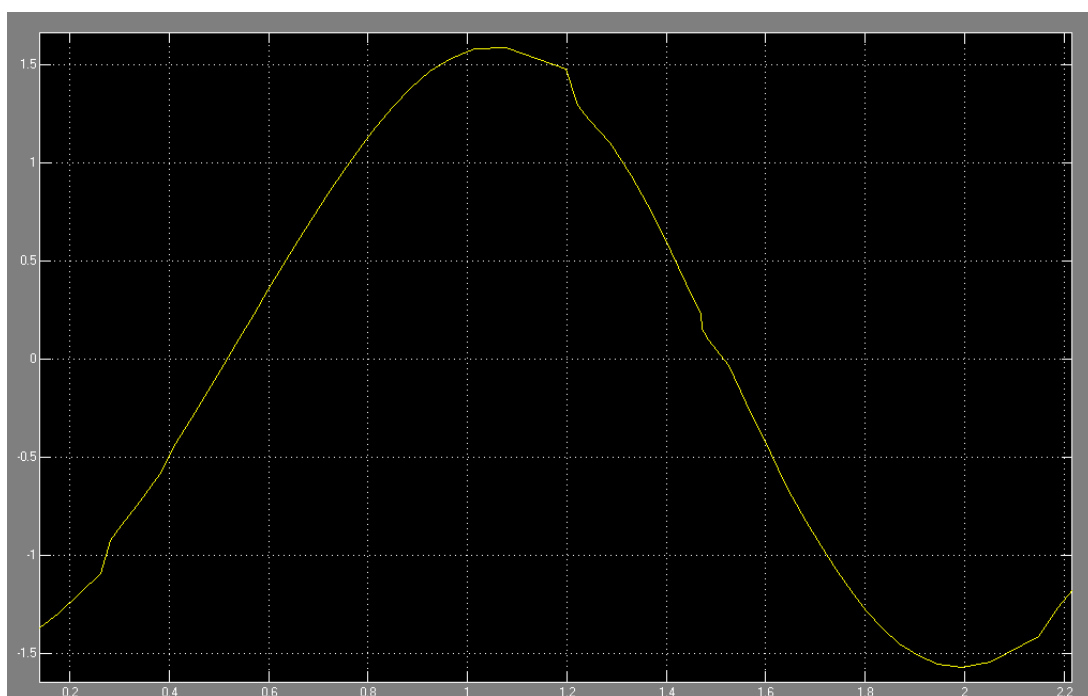
### Velocidad de la articulación A1

En la primera gráfica (Figura 69) podemos observar una secuencia de varios ciclos de la simulación donde se aprecia que la trayectoria seguida por la articulación A1 sigue la función de partida la senoide. Lo que demuestra que existe linealidad entre los parámetros de estudio en este caso la velocidad y la posición del mecanismo.



**Figura 69: Detalle Velocidad A1.**

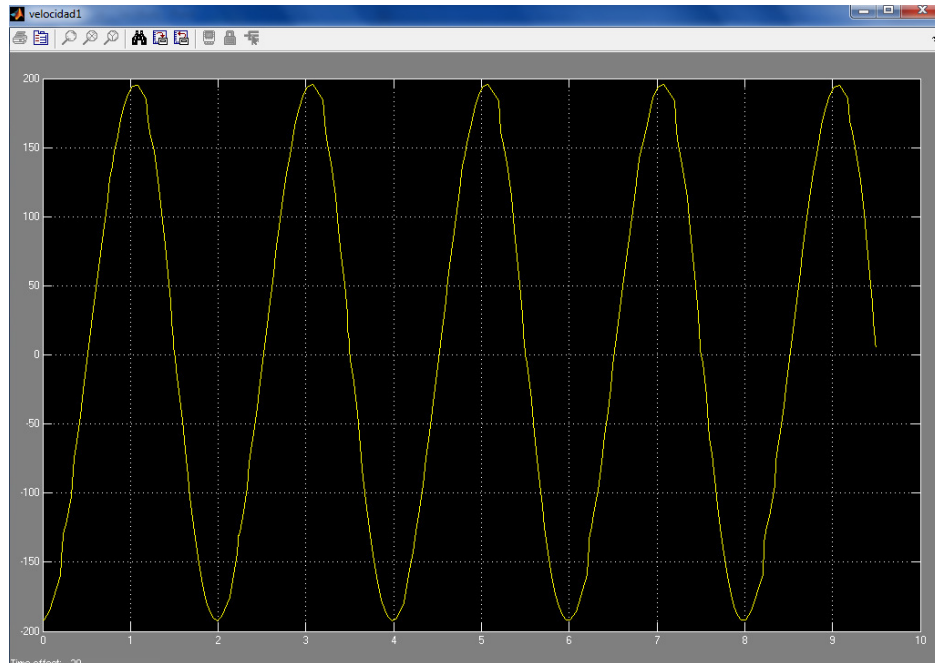
Para ver con más detalle la senoide hacemos zoom para fijarnos en un único ciclo (Figura 70). Gracias al zoom podemos observar ciertas irregularidades en la forma de la senoide lo que puede indicar que la linealidad que presuponíamos no era tal.



**Figura 70: Detalle de un ciclo de la velocidad A1.**

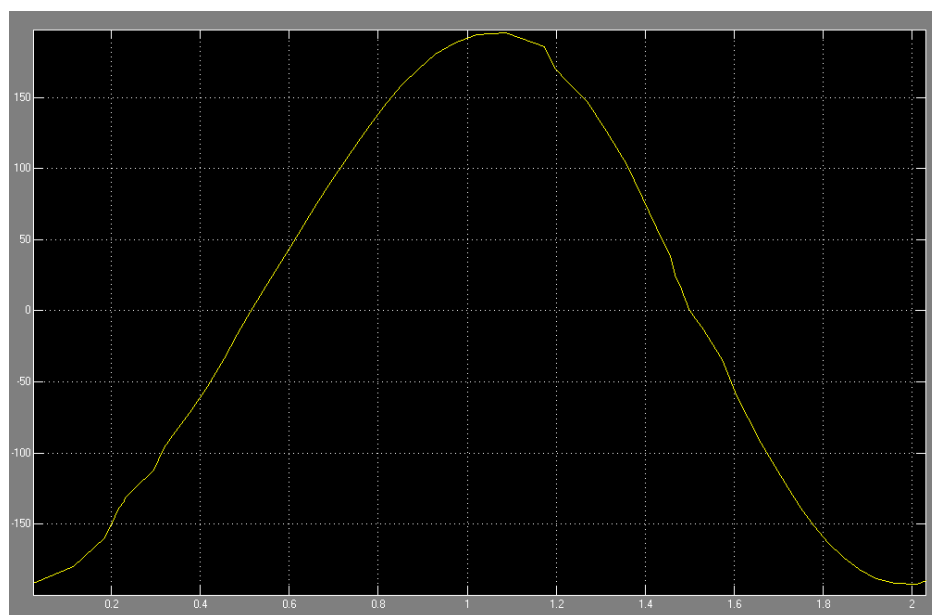
## Velocidad de la articulación A2

Observamos el mismo comportamiento en la articulación A2 lo que refuerza nuestra hipótesis de partida (Figura 71).



**Figura 71: Detalle Velocidad A2.**

Volvemos a realizar zoom para ver con más detalle un único ciclo del movimiento (Figura 72). Se repite la aparición de irregularidades en la forma del senoide, aunque estas son apenas imperceptibles al ser la primera derivada de la posición, la velocidad.

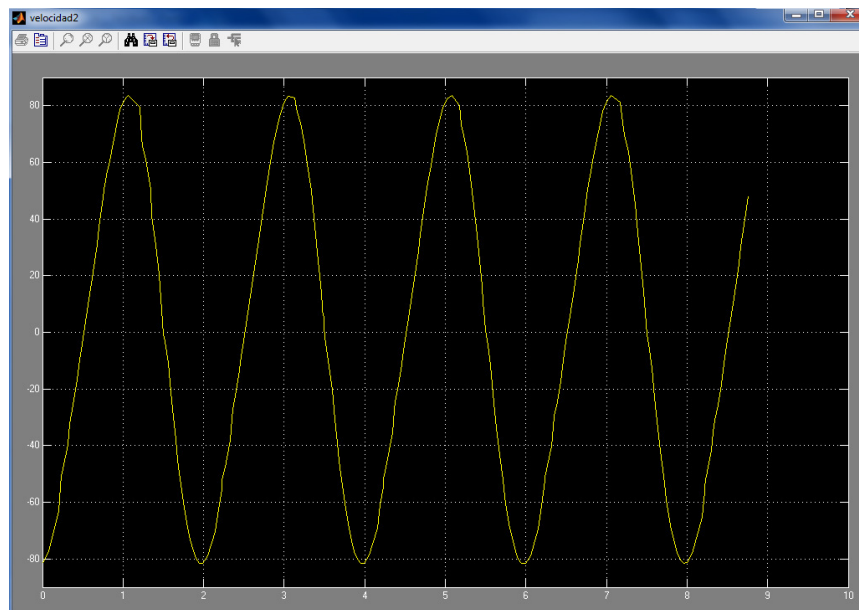


**Figura 72: Zoom para un ciclo Velocidad A2.**



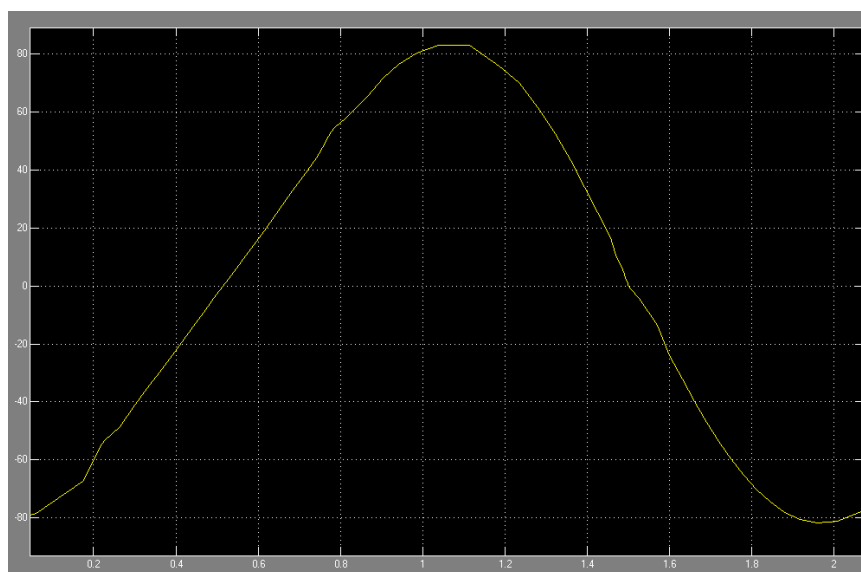
### Velocidad de la articulación A3

Para completar el análisis de la velocidad analizamos la velocidad de la articulación A3 a lo largo de la simulación. Podemos ver en la Figura 73 una secuencia de ciclos. Se ajustan a la forma senoidal impuesta por nosotros como trayectoria por lo que el dedo sigue las trayectorias marcadas sin mucho error.



**Figura 73: Detalle Velocidad A3.**

Haciendo zoom para observar un solo ciclo (Figura 74) de la simulación se siguen produciendo irregularidades en la forma de la senoide. Aunque podemos despreciar dichas irregularidades por casi insignificantes.

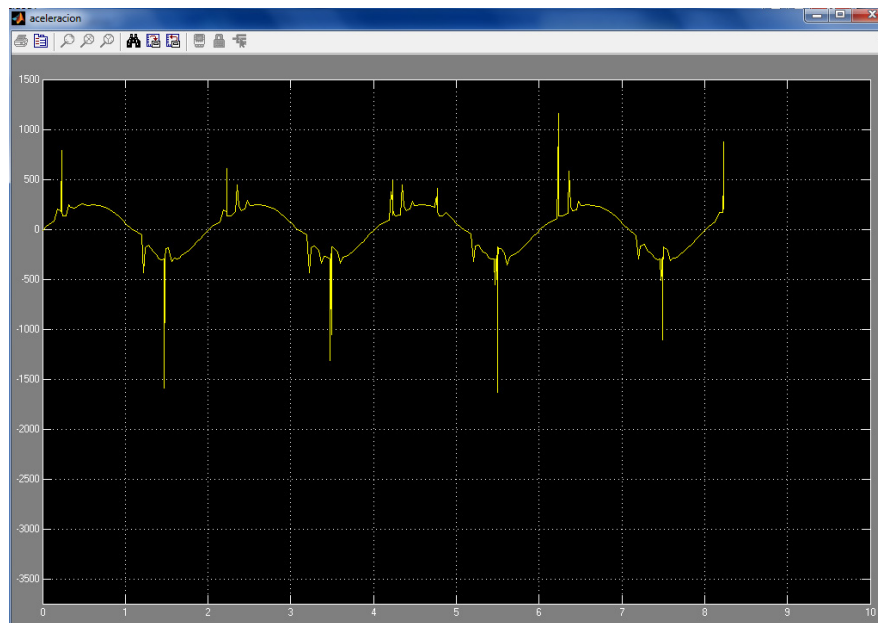


**Figura 74: Detalle un ciclo Velocidad A3.**

Una vez hemos visto los resultados de la velocidad, pasamos a ver cómo se comportan los eslabones en términos de aceleración.

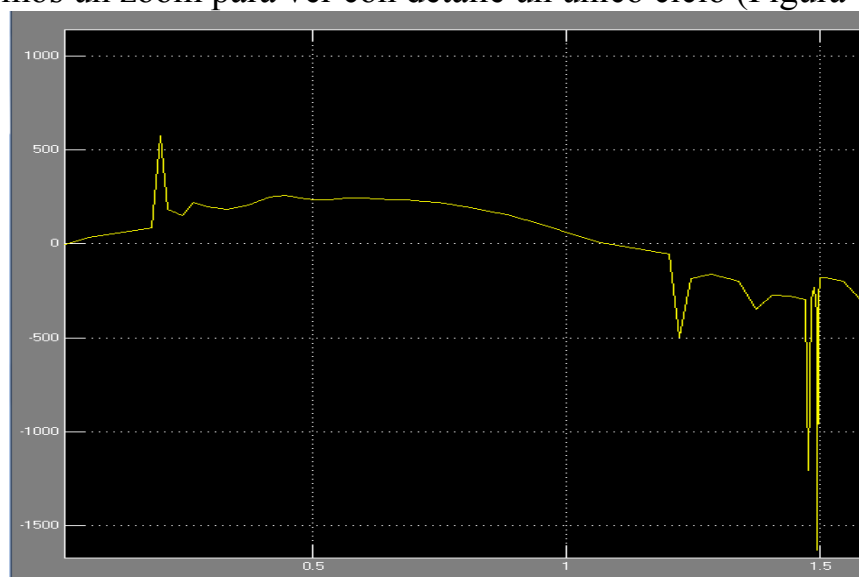
### Aceleración de la articulación A1

Al simular el mecanismo se han obtenido los siguientes resultados para la aceleración de la articulación A1 (Figura 75).



**Figura 75: Detalle Aceleración A1.**

Sin necesidad de hacer zoom ya se puede apreciar que, aunque mantiene una estructura senoidal, se producen irregularidades y saltos que nos inducen a pensar que existe algún tipo de fallo en la linealidad. Aún así realizaremos un zoom para ver con detalle un único ciclo (Figura 76).

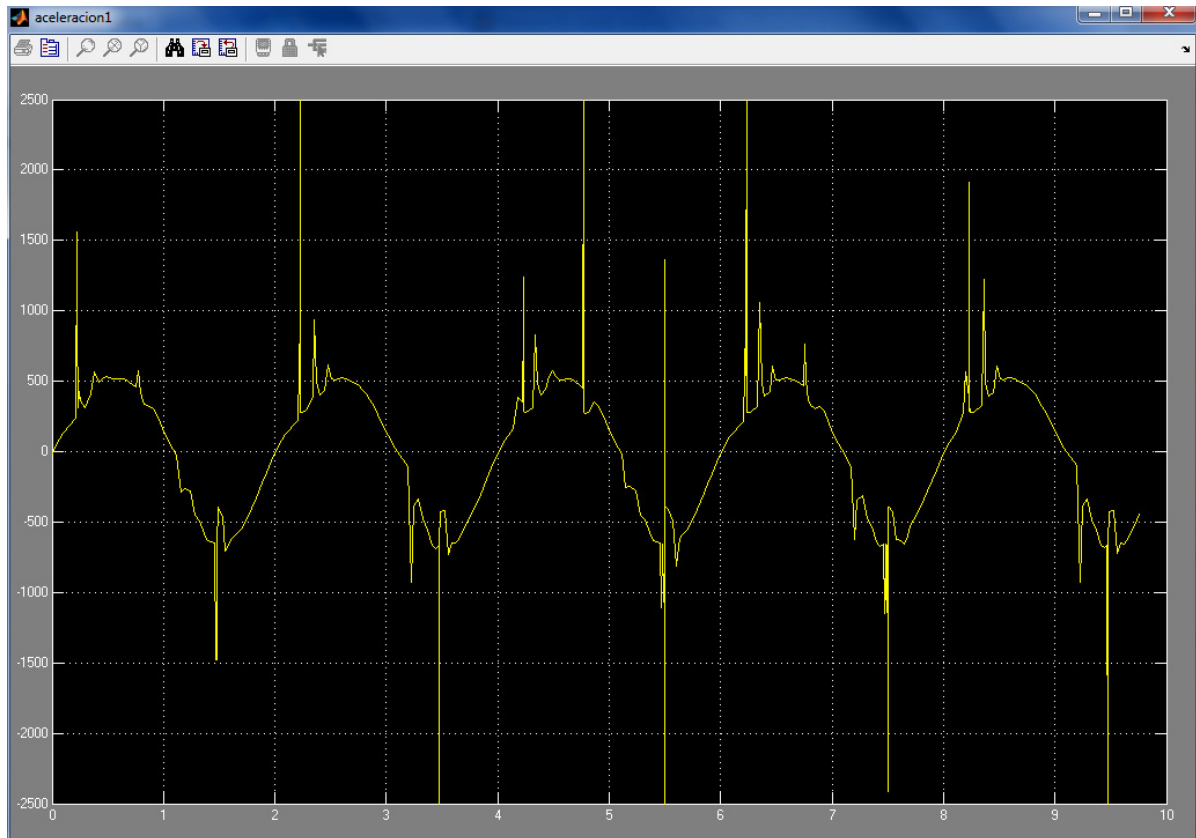


**Figura 76: Detalle Zoom Aceleración A1.**

Se observan grandes irregularidades que pueden producir fallos debidos al desgaste en la articulación que hagan disminuir la fiabilidad del mecanismo.

### Aceleración de la articulación A2

En la articulación A2 vemos que se repiten las mismas características que hemos visto en la articulación anterior.

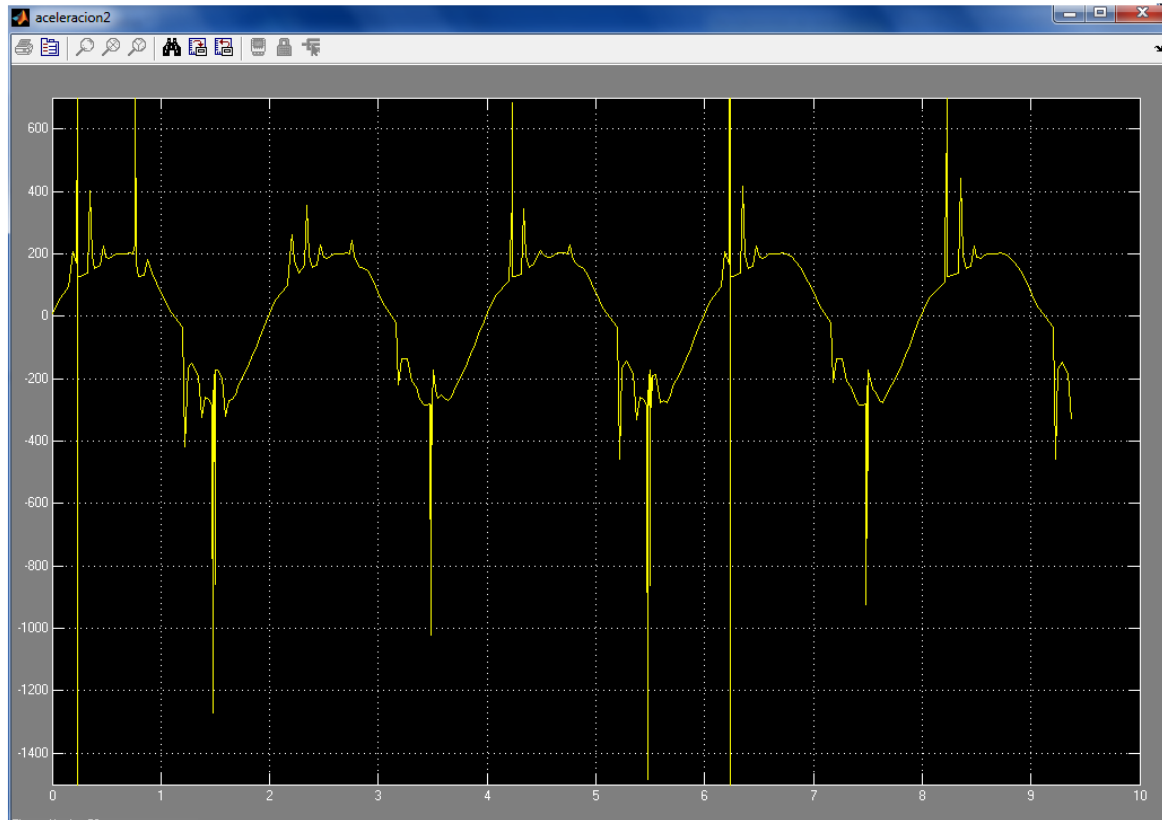


**Figura 77: Detalle Aceleración A2.**

Otra vez sin necesidad de realizar un zoom en la secuencia de ciclos se pueden apreciar grandes saltos e irregularidades en la forma de la senoide (**Figura 77**).

### Aceleración de la articulación A3

Los resultados para la articulación A3 no hacen más que comprobar la aparición de irregularidades en el diseño. Una vez más se pueden observar las irregularidades sin necesidad de hacer zoom (Figura 78) sobre la secuencia de ciclos lo que no hace más que demostrar que el diseño actual podría provocar fallos en el mecanismo.



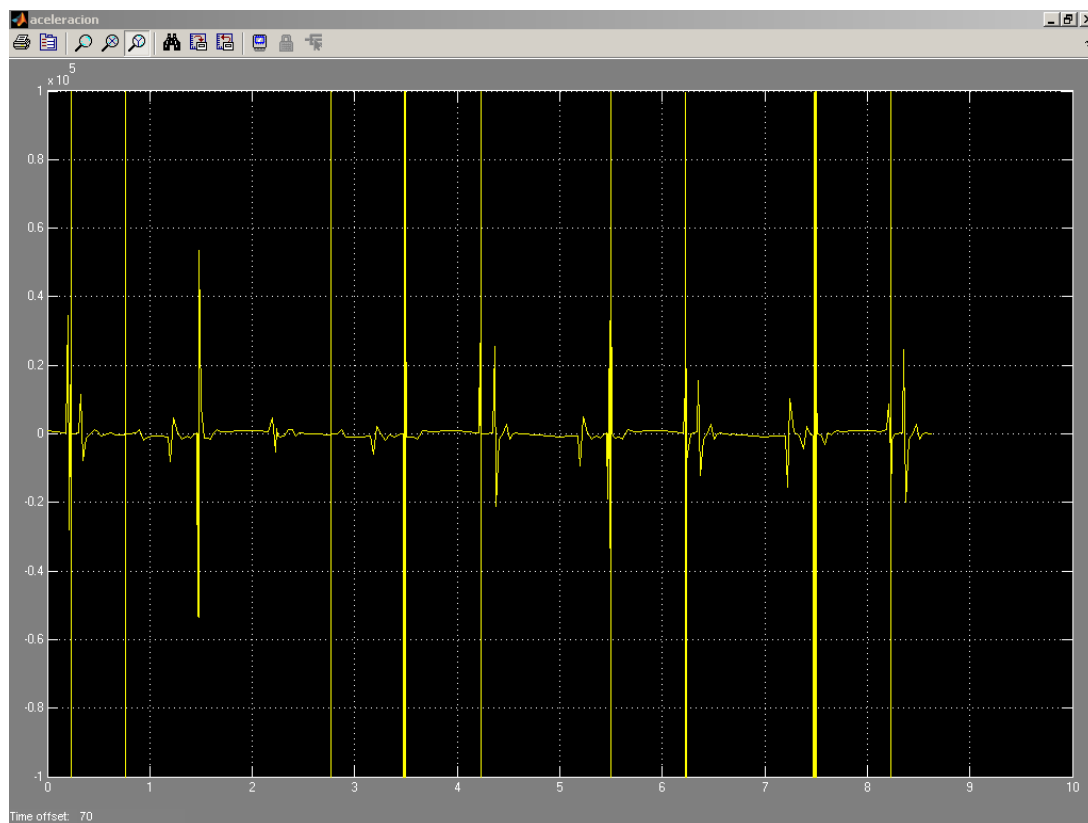
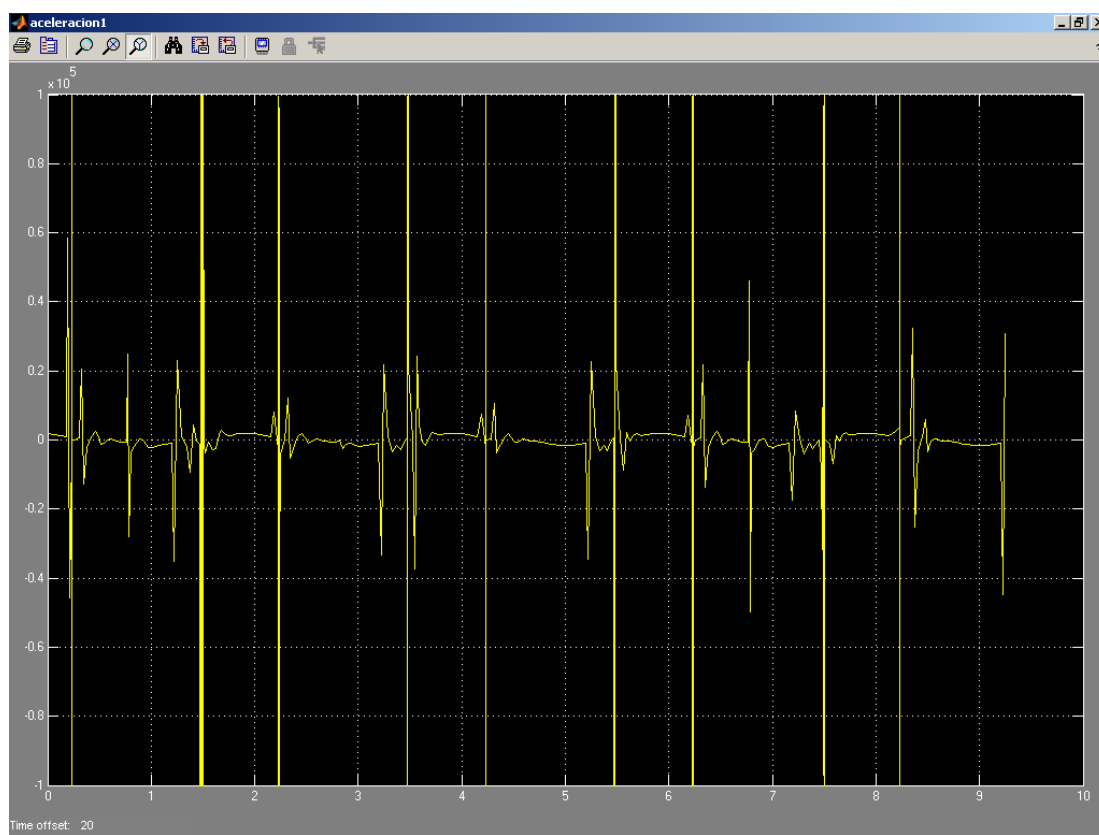
**Figura 78: Detalle Aceleración A3.**

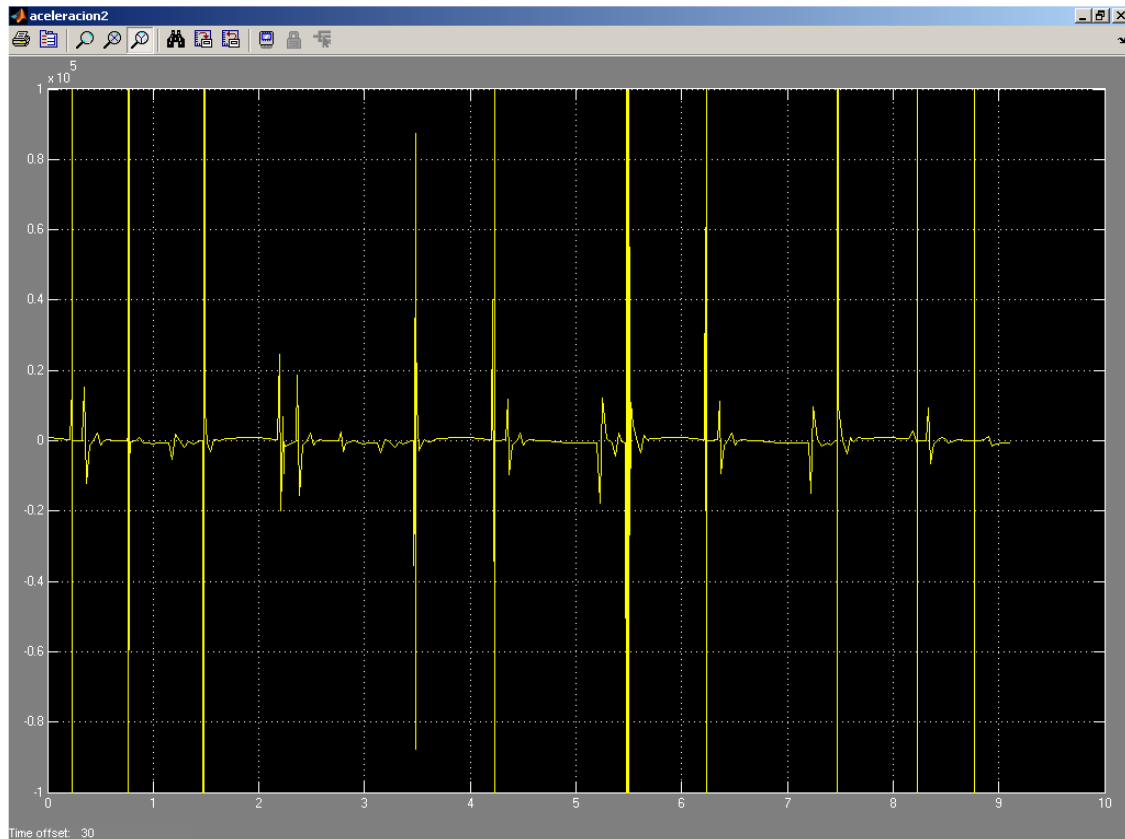
A la vista de las irregularidades observadas en la aceleración, se ha decidido estudiar también las sobre aceleraciones. Así conoceremos si estas irregularidades son producidas a sobre aceleraciones de valor infinito.

### Sobre aceleraciones

El estudio de las sobreaceleraciones nos permite conocer cambios bruscos en la aceleración del mecanismo mientras sigue una trayectoria determinada. Tras haber visto las irregularidades en las aceleraciones, más pronunciadas que en el caso de la velocidad, se puede adivinar que las irregularidades en las sobreaceleraciones seguirán el mismo patrón. Esto es debido al tratarse de derivadas.

En las figuras 79, 80 y 81 se pueden ver las sobreaceleraciones en las articulaciones A1, A2 y A3 respectivamente.

**Figura 79: Detalle Sobreaceleración A1.****Figura 80: Detalle Sobreaceleración A2.**



**Figura 81: Detalle Sobreaceleración A3.**

Como se puede apreciar en las figuras 79,80 y 81 se producen sobreaceleraciones de valor infinito. Esto significa que el mecanismo, durante su movimiento, estará sometido a tirones o sacudidas que podrían provocar el desgaste del mecanismo disminuyendo su fiabilidad.

### 7.1.3 Análisis dinámico

El análisis dinámico de mecanismos permite determinar a partir del movimiento de un mecanismo, las fuerzas y los esfuerzos internos que aparecen sobre cada uno de sus elementos en cada posición de funcionamiento. Este test consistirá en fijar las articulaciones del dedo de tal forma que al aplicar un par de entrada fijo sobre las articulaciones del mecanismo movidas por los tendones veamos el par de reacción que se produce en las articulaciones del dedo, es decir, el par al que estaría sometido el dedo. Este análisis, como ya se explicó en la propuesta de diseño, se ha realizado para un conjunto representativo de las posiciones que se pueden lograr con el mecanismo. También podremos ver si existe una linealidad entre estas variables y así obtener algún tipo de fórmula matemática que nos permita predecir que par necesitaremos provocar sobre el mecanismo para conseguir mover el dedo.





Al igual que en el análisis anterior, nombraremos a cada articulación de la siguiente manera (00): A la articulación que une el metacarpo con la falange proximal (A1), la que une la falange proximal con la media (A2) y la que une la media con la distal (A3). Las medidas de ángulo se darán en radianes (rad) y los pares en (N·m).

### Resultados del análisis dinámico

A continuación se muestran los datos obtenidos en el *Simmechanics* cuando hemos introducido un par de entrada fijo de 5 Nm. Se han realizado dos tipos de medidas:

1) Cada articulación por separado:

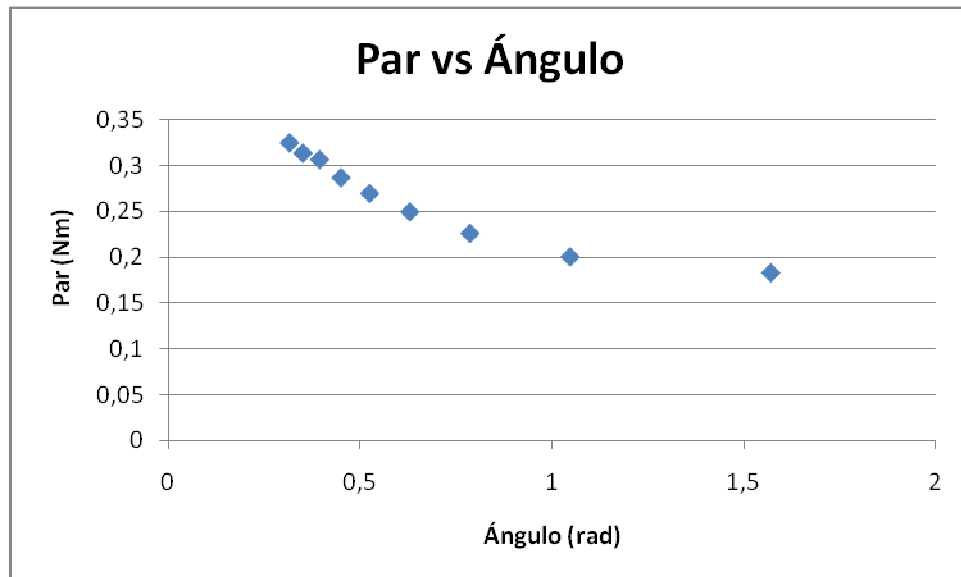
A1		A2		A3	
Ángulo(rad)	Par(Nm)	Ángulo(rad)	Par(Nm)	Ángulo(rad)	Par(Nm)
0,31416	0,3252	0,31416	4,4673	0,31416	3,8586
0,349	0,314	0,349	4,461	0,349	3,8357
0,3926	0,307	0,3926	4,4192	0,3926	3,8055
0,4487	0,2871	0,4487	4,3839	0,4487	3,764
0,5235	0,2699	0,5235	4,3352	0,5235	3,7037
0,6283	0,2497	0,6283	4,2631	0,6283	3,6085
0,7854	0,2262	0,7854	4,1438	0,7854	3,04386
1,047	0,2005	1,047	3,9056	1,047	3,0646
1,571	0,183	1,571	3,2509	1,571	1,8397

**Tabla 3: Par en función de la posición a partir de un par fijo.**

Para tener una visión más clara de la relación de los datos obtenidos se han representado en Excel.

Ahora representando los datos obtenidos:

-Para A1:

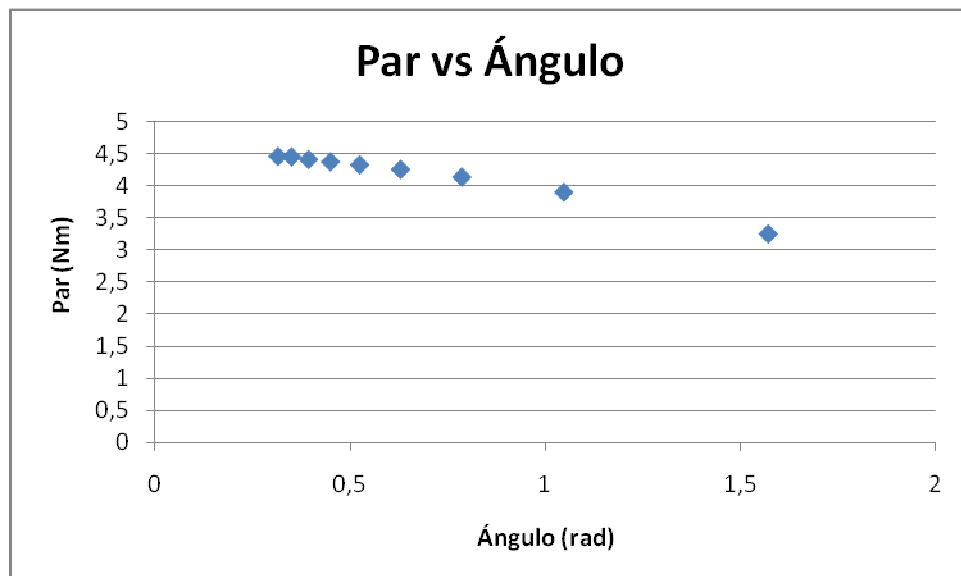


Gráfica 1: Par en función de la posición a partir de un par fijo A1.

Ecuación de la recta aproximada:

$$y = -0,1162x + 0,3407$$

-Para A2:

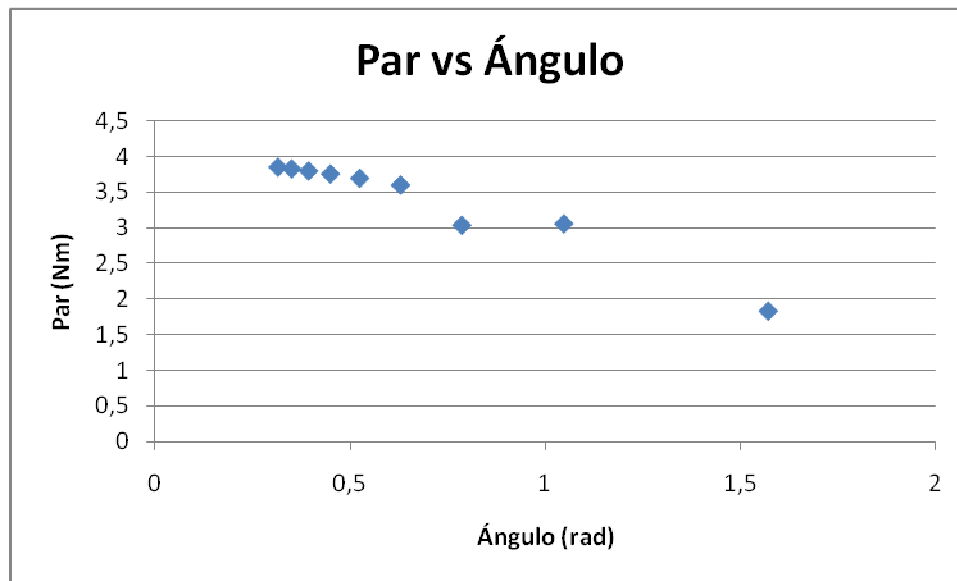


Gráfica 2: Par en función de la posición a partir de un par fijo A2.

Ecuación de la recta aproximada:

$$y = -0,9472x + 4,8189$$

-Para A3:



**Gráfica 3: Par en función de la posición a partir de un par fijo A3.**

Ecuación de la recta aproximada:

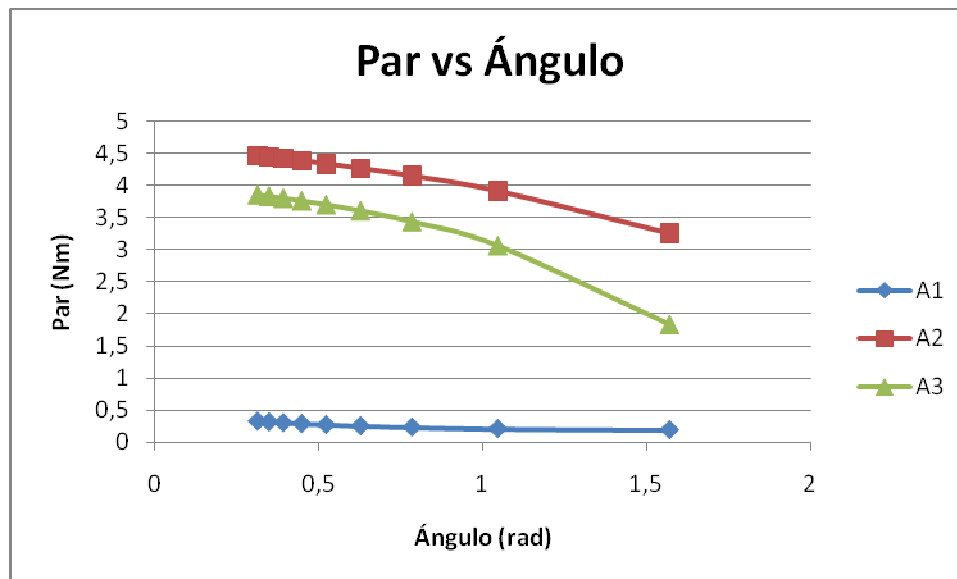
$$y = -1,5769x + 4,4533$$

2) Las tres articulaciones a la vez:

Ángulo(rad)	Par_A1(Nm)	Par_A2(Nm)	Par_A3(Nm)
0,31416	0,3258	4,4679	3,8588
0,349	0,3152	4,4469	3,836
0,3926	0,3029	4,4204	3,8059
0,4487	0,2888	4,3856	3,7646
0,5235	0,2724	4,3377	3,7045
0,6283	0,2534	4,2667	3,6097
0,7854	0,2321	4,1497	3,4391
1,047	0,2089	3,9141	3,0667
1,571	0,1914	3,2591	1,8399

**Tabla 4: Par en función de la posición a partir de un par fijo.**

Representando los datos:



Gráfica 4: Par en función de la posición a partir de un par fijo.

#### 7.1.4 Conclusiones

En cuanto al análisis cinemático de las trayectorias seguidas por el mecanismo. La relación entre las trayectorias de entrada y de salida es casi lineal. Salvo por la existencia de pequeñas no linealidades que pueden ser perjudiciales para el mecanismo debido a las sobre aceleraciones de valor infinito que producirían sacudidas durante el funcionamiento que pueden dañar el mecanismo.

En cuanto al análisis dinámico, los pares de salida siguen una cierta relación, aproximadamente lineal, con los pares de entrada. Esta relación podría predecirse mediante el análisis de más pares de salida en función de distintos pares de entrada fijos. A la hora de dimensionar los motores necesarios para cumplir las especificaciones de par mínimo en las articulaciones de los dedos se puede ver que el par de salida para un par de entrada fijo es menor en las posiciones angulares correspondientes a un puño cerrado. Por lo tanto, los motores elegidos deberán ser capaces de proporcionar un par suficiente como para producir el movimiento hasta dichas posiciones.



## 7.2 Análisis de elementos finitos mediante Ansys

El análisis de elementos finitos es una técnica de simulación por ordenador muy usada en ingeniería. El software utiliza lo que se conoce como método de elementos finitos. El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. El MEF se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos. El objetivo es analizar los eslabones del exoesqueleto con el fin de determinar las tensiones a las que están sometidos. En este proyecto se utilizará el paquete de software *Ansys 12.0*.

### 7.2.1 ¿Qué es Ansys y cómo funciona?

Esta aplicación es un programa de elementos finitos muy utilizado en la industria como herramienta de estudio del comportamiento mecánico de componentes de máquinas, estructuras, etc.

El procedimiento de análisis en *Ansys* se divide en tres fases: preprocesado, solución y postprocesado. En la fase de preprocesado se introducen las características físicas y geométricas del modelo. Es la fase que más tiempo requiere de todo el análisis. En la fase de solución se aplica el sistema de cargas al modelo y se eligen los parámetros de solución del sistema de ecuaciones que genera el problema. Por último, en la fase de postprocesado se obtienen los resultados del análisis y se presentan de múltiples formas para poder así sacar las conclusiones que procedan.

#### Preprocesado

La creación del modelo de elementos finitos es la fase del análisis que normalmente requiere de un mayor tiempo. Esta fase se divide en varias subfases:

- Definición del tipo de elemento a utilizar: Ansys ofrece más de 150 tipos diferentes de elementos. La elección del tipo de elemento determina entre otras cosas los grados de libertad implicados en el análisis y la dimensión del espacio en el cual se construye el modelo. Por otro lado, la elección del tipo de elemento condiciona la naturaleza de los resultados obtenidos y el método de cálculo de los mismos.



- Definición de propiedades de la sección: Una vez elegido el tipo o los tipos de elementos a utilizar en el modelo, se deben definir la geometría de la sección por medio de constantes reales, proporcionando a Ansys magnitudes indirectas de la geometría como los momentos de inercia, o se puede llevar a cabo mediante la creación de secciones transversales, opción que ofrecen una serie de elementos en Ansys, en los cuales basta definir magnitudes directas de la geometría como altura, anchura, etc., encargándose el software de calcular parámetros como los momentos de inercia o centroides.
- Modelización del material: La mayoría de los distintos tipos de elementos requieren propiedades del material. Dependiendo de la aplicación, las propiedades del material pueden ser lineales o no lineales. Dentro de un mismo análisis se pueden utilizar múltiples conjuntos de propiedades de material (correspondientes al número de materiales diferentes presentes en el modelo), definiendo estos aspectos como la densidad, el módulo de Young o el coeficiente de Poisson del material.
- Creación de la geometría del modelo: Dentro del preprocesado, esta es la fase más extensa. En ella se define la geometría del modelo, a la cual se le asociará *a posteriori* un material, una sección y un tipo de elemento.
- Mallado del modelo: En la fase de mallado del modelo, se divide la geometría creada en elementos, a los cuales se les asociará una serie de atributos de sección, tipo de elemento y material.

## Solución

En la fase de solución se define el tipo de análisis a efectuar, se aplica el sistema de cargas al modelo y se soluciona el sistema de ecuaciones generado por el problema. Esta fase se divide en tres subfases:

- Definición del tipo de análisis: La elección del tipo de análisis depende de las condiciones de carga aplicadas al modelo y de los resultados que se pretenden obtener. Además, no todos los tipos de elementos disponibles en Ansys son válidos para todas las disciplinas.
- Aplicación de cargas: El término cargas en Ansys incluye todas las condiciones de contorno impuestas al modelo (coacciones, soportes,

etc.) además otra clase de esfuerzos aplicados externa e internamente sobre el modelo. En esta fase se definen todos los campos y esfuerzos aplicados al modelo además de sus coacciones.

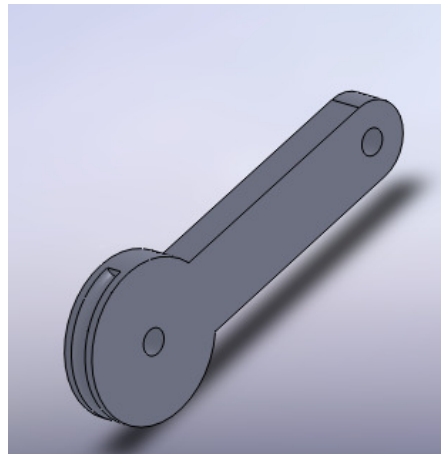
- Solución: En la fase de solución el software soluciona el sistema de ecuaciones generado por el problema planteado.

## Postprocesado

En la fase de postprocesado se presentan y manipulan los resultados obtenidos en la fase de solución. Ansys ofrece multitud de posibilidades de presentación y manipulación de datos, ofreciendo distintas clases de resultados. Es necesario elegir visualizaciones que presenten aquellos aspectos que se deseen estudiar del modelo, con el fin de poder obtener las conclusiones apropiadas.

Hasta ahora se han explicado que vamos a realizar a nuestro diseño pero falta comentar que este estudio no se aplicará a todo el mecanismo sino solamente a los elementos claves responsables de su movimiento.

Estos elementos son los eslabones (Figura 82) que están conectados a los tendones y que serán los encargados de producir el movimiento al resto de elementos del mismo. Por ello serán los elementos que estarán sometidos a mayores tensiones y por tanto, serán el objetivo de este estudio.



**Figura 82: Eslabones a los que se conectan los tendones.**

Con este estudio se han visto exactamente cuáles son los esfuerzos que está soportando dicho elemento y si es necesario mayores refuerzos que los diseñados a priori (Mayor diámetro), o por el contrario, podremos ver si es posible reducir el tamaño y peso de los mismos.



### 7.2.2 Obtención del modelo de elementos finitos

A la hora de utilizar Ansys se pueden plantear dos opciones: la primera es dibujar el modelo a estudiar con las herramientas de dibujo que incorpora el programa y la segunda es importar un modelo CAD en las diferentes formas que acepta el programa (IGES, PARASOLID, PRO-ENGINEER, CATIA).

Puesto que se había realizado previamente el diseño en Solid Works, se ha optado por la segunda opción: importar el modelo CAD. Para ello se ha utilizado el formato IGES, el primer paso es guardar el diseño CAD directamente en Solid Works con el formato \*Igs. Para ello se va a guardar como y debajo de dónde se elige el nombre del archivo, abrimos el desplegable y buscamos el formato elegido (Figura 83).

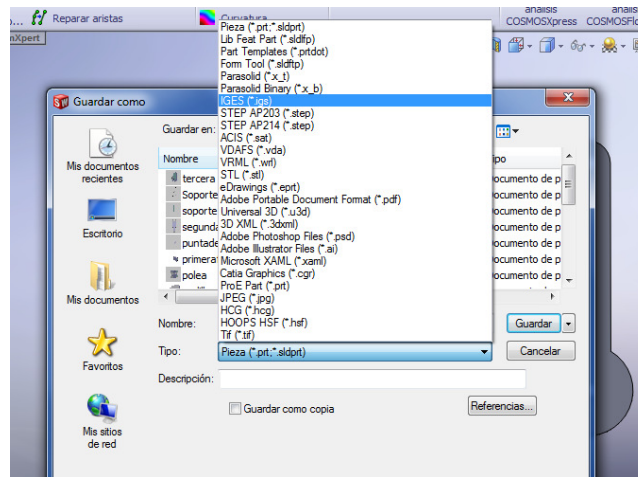


Figura 83: Cuadro de diálogo en el que se lleva a cabo la elección de tipo de formato.

Abrimos ahora Ansys e importamos el modelo. Pinchamos en File/Import/IGES (Figura 84).

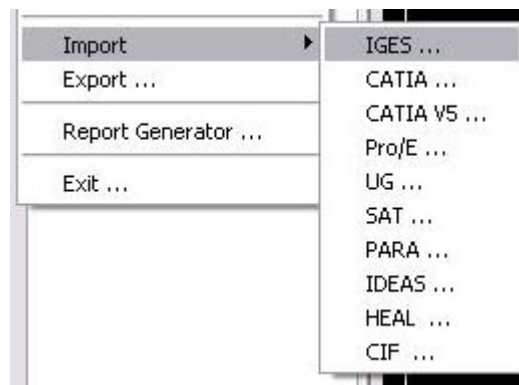


Figura 84: Los diferentes tipos de formatos que puede importar Ansys.



Ahora nos aparecerá una ventana en la que seleccionaremos las siguientes opciones (Figura 85).

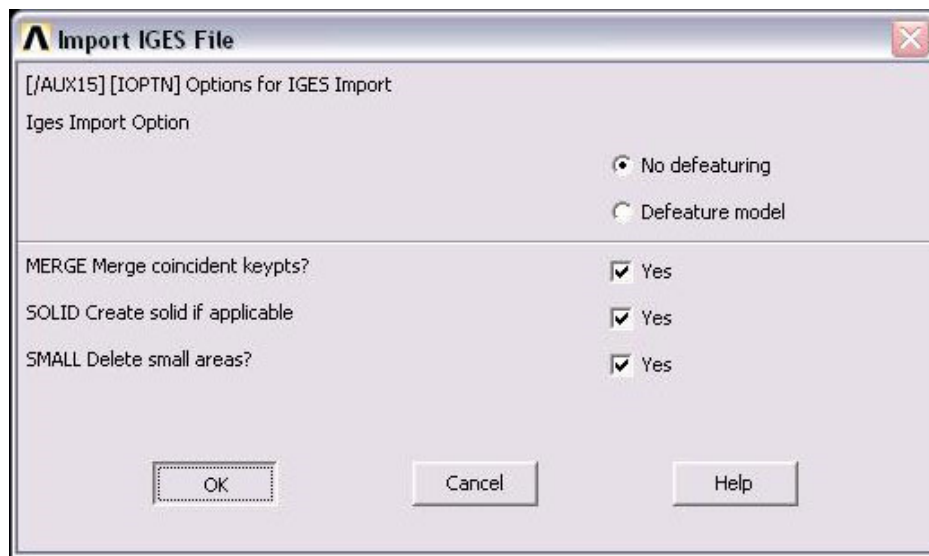


Figura 85: Opciones a considerar cuando se importa el modelo.

Una vez localizado e importado nuestro archivo, nos aparece el diseño CAD en el entorno *Ansys* (Figura 86).

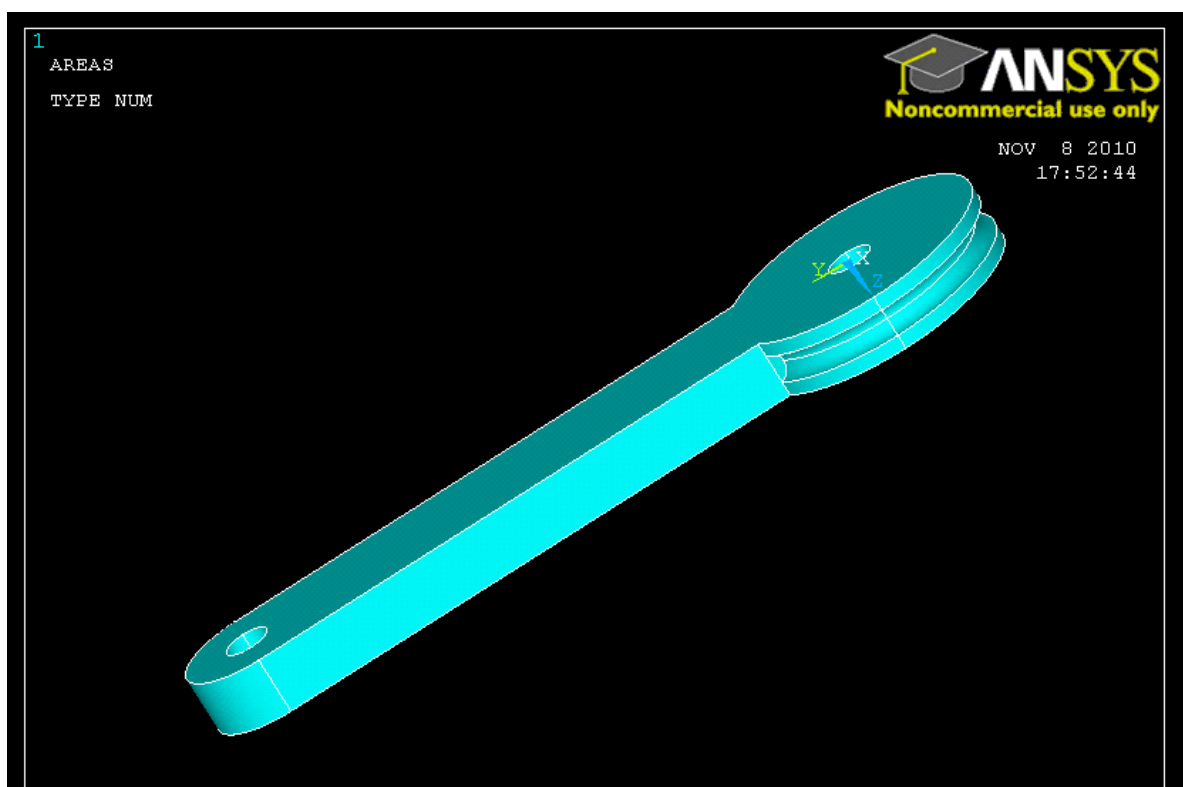


Figura 86: Modelo importado.



### 7.2.3 Unidades en el modelo

Una de las particularidades de *Ansys* es que no trabaja con unidades. El usuario es responsable de que los datos introducidos sean consistentes entre sí. Por ello es necesario definir una tabla de unidades a utilizar para asegurar su consistencia.

Las unidades básicas serán las siguientes:

- Longitud → m
- Masa → kg
- Tiempo → s

A partir de estas unidades básicas se obtendrán las tensiones que serán el objeto de estudio en la unidad del S.I., los Pascales (Pa).

- Fuerza (F) =  $m \cdot a = \text{Kg} \cdot \text{m/s}^2 = \text{N}$
- Tensión ( $\sigma$ ) = Fuerza / Área =  $\text{N/m}^2$
- $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$

### 7.2.4 Preprocesado

Esta fase se divide en cuatro subfases:

- 1) Definición de elemento a utilizar: De acuerdo con nuestro modelo 3D eligiremos el Solid187. Para seleccionarlos seguimos lo siguiente: Preprocessor>Element type> Add/Edit/Delete (Figura 87).

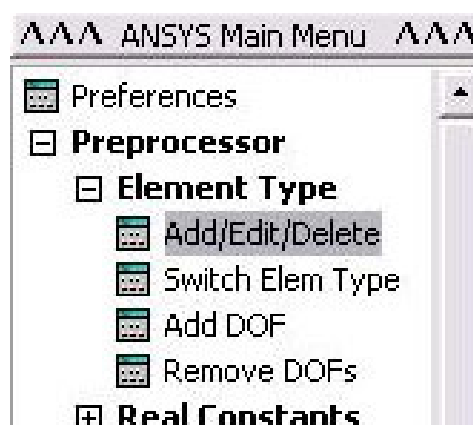


Figura 87: Tipo de elemento.

Hacemos click en Add y buscamos el tipo de elemento elegido (Figura 88).

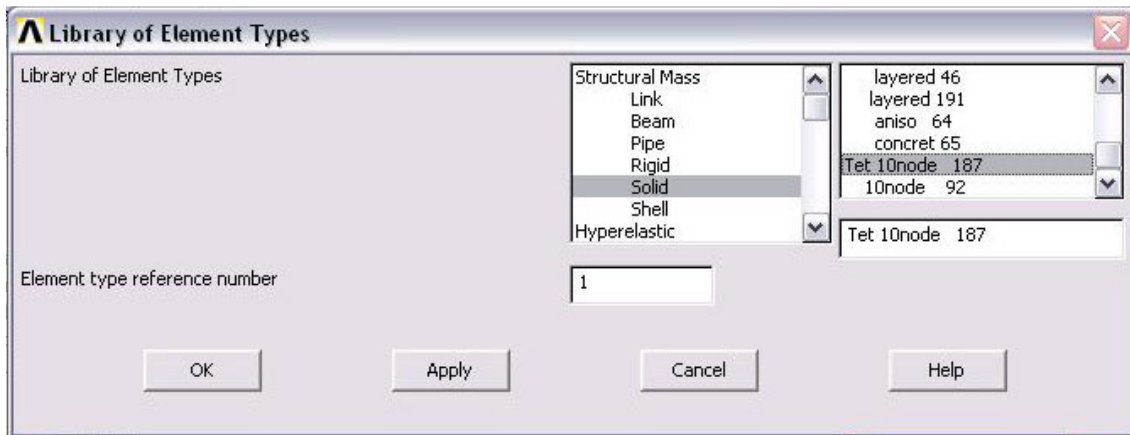


Figura 88: Elección del tipo de elemento.

2) Modelización del material: Nuestro diseño está pensado para implementarse en Aluminio, ahora introduciremos las propiedades del mismo necesarias para el estudio. **Preprocessor>Material Props>Material Models** (Figura 89).

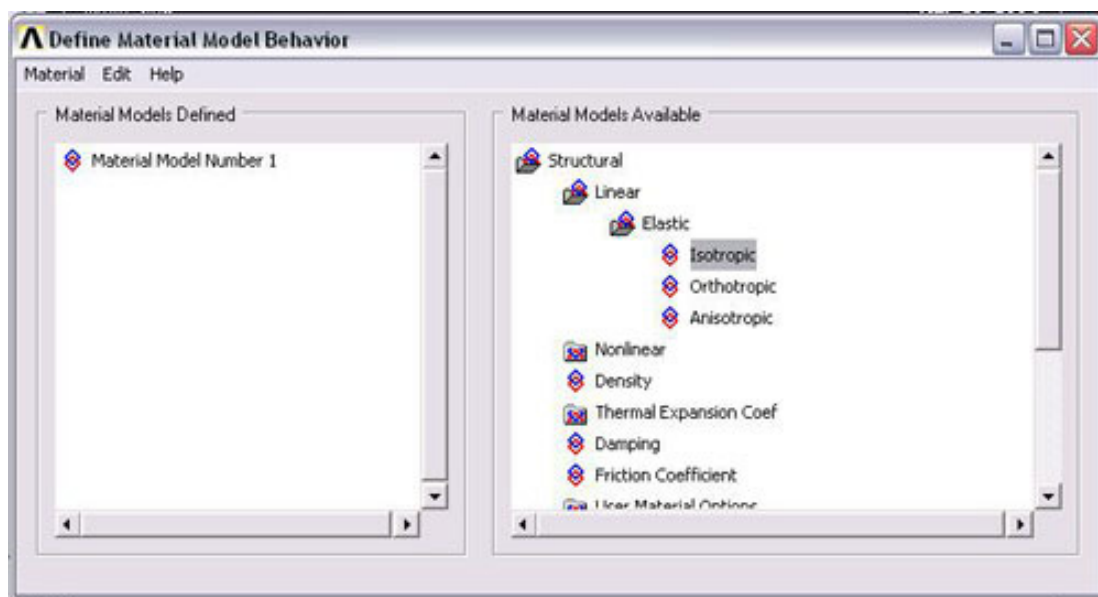
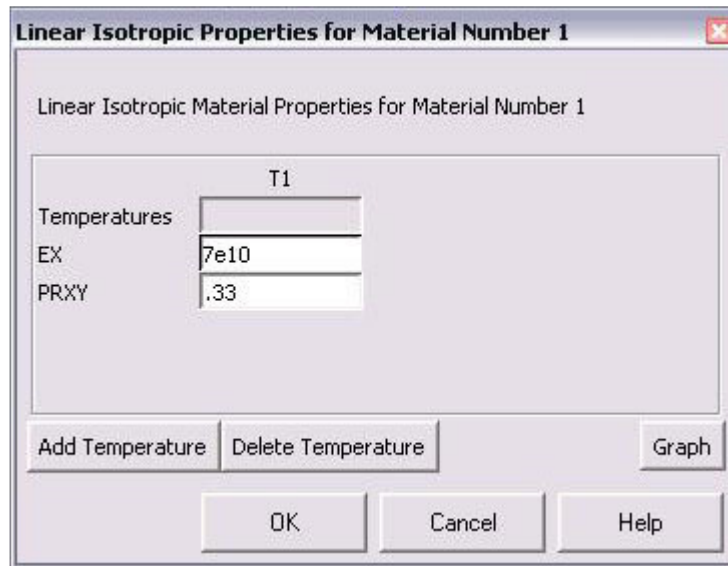


Figura 89: Tipo de material.

Introducimos los valores del módulo elástico y el coeficiente de poisson relativos al Aluminio. Siempre conservando las unidades descritas en el apartado 7.2.3.

**Modulo elástico (E) =  $7 \cdot 10^{10}$  Pa.**  
**Coeficiente de poisson (v) = 0.3**

Ahora seleccionamos Structural>Elastic>Isotropic e introducimos los valores de las propiedades del Aluminio (Figura 90).



**Figura 90: Propiedades del aluminio.**

- 3) Mallado del modelo: Para mallar el elemento en elementos individuales, conocidos como nodos que nos permitirán conocer la distribución de tensiones a lo largo de la superficie del eslabón, vamos a Preprocessor>Meshing>MeshTool (Figura 91).



**Figura 91: Opciones de mallado.**

Aparacerá la ventana de MeshTool en el lado derecho de la pantalla. Tras seleccionar el volumen a mallar se obtiene lo siguiente (Figura 92).

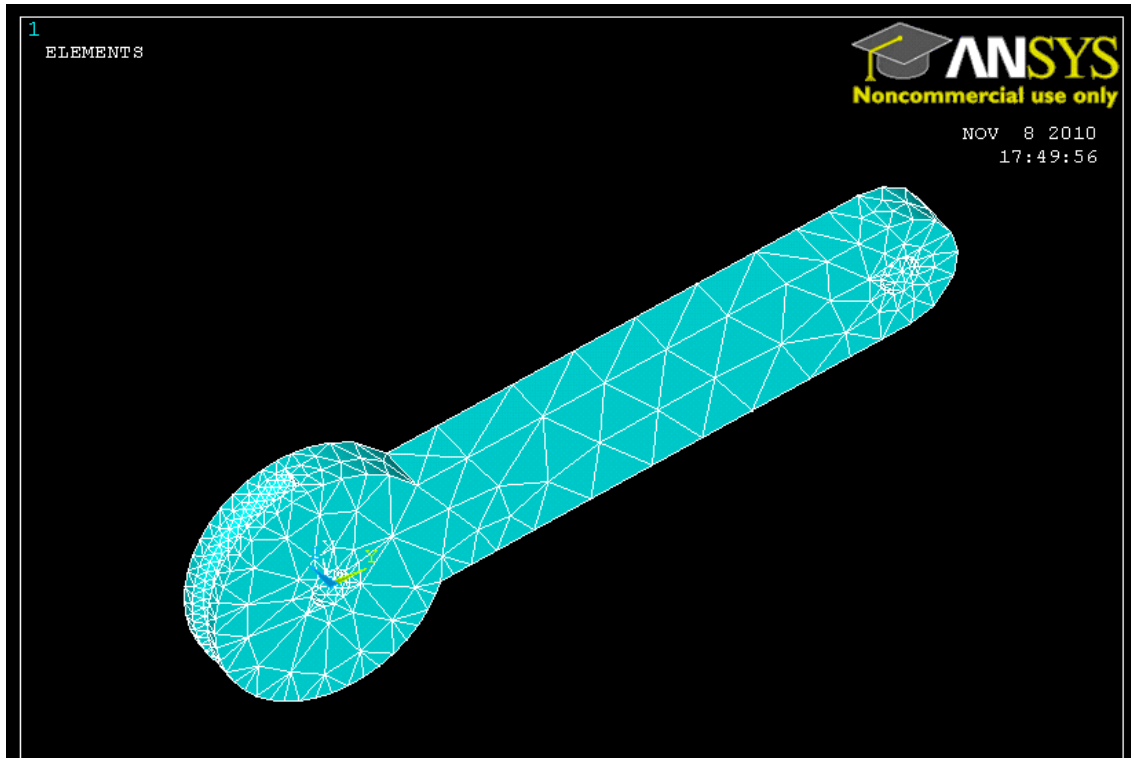


Figura 92: Malla.

Para obtener una mejor solución es necesario refinar la malla en las zonas que consideramos más importantes para el estudio. En nuestro caso hemos refinado el mallado en los taladros pues es una zona de concentración de tensiones. Para refinar el mallado vamos a **Preprocessor>Meshing>Modify Mesh>Refine at>Areas** y elegimos los areas a refinar.

- 4) Condiciones de contorno: Antes de iniciar la solución del problema necesitamos conocer las condiciones de contorno que ayudarán al programa a resolver el sistema de ecuaciones. Nuestro problema es el siguiente (Figura 93):

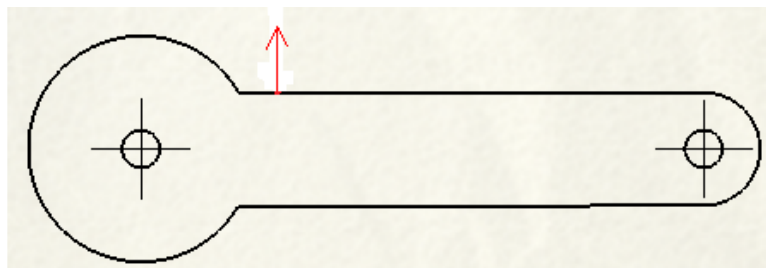


Figura 93: Condiciones de contorno.

Considerando ambos taladros como apoyos, ya que no se permitirá el desplazamiento de los mismo en ninguno de los ejes a excepción del giro. También deberemos colocar las fuerzas que se aplican sobre nuestro eslabón. En nuestro caso esta fuerza se debe al tendón que irá atado al eslabón y que provocará el movimiento del mismo. Utilizando los datos de la simulación mediante *Simmechanics*. Imponemos una fuerza de 5 N perpendicular a la superficie lateral del eslabón. Esta será una aproximación aceptable de la reacción que creará el cable sobre el eslabón. Para especificar los grados de libertad de nuestro elemento vamos a **Preprocessor>Loads>DefineLoads>Apply>Structural>Displacement>On Areas** y le decimos al programa como es nuestro problema (Figura 94).

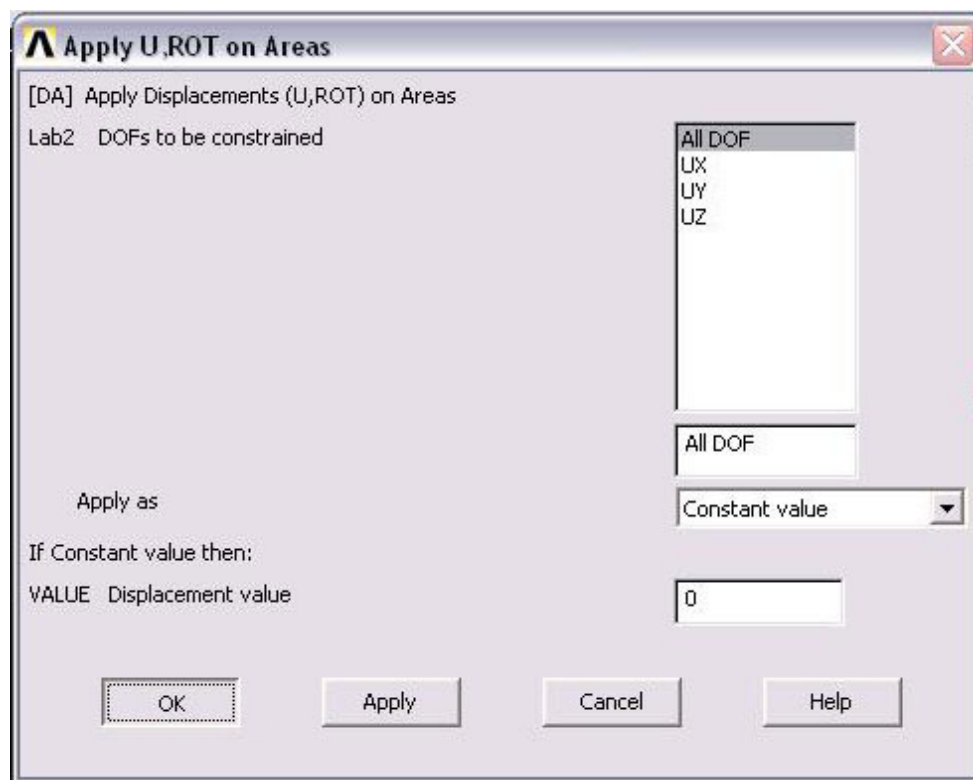


Figura 94: Valores de desplazamiento.

Para aplicar las fuerzas vamos a **Define Loads >Structural >Force/Moment > On Nodes** y colocamos las fuerzas en el lugar en el que son aplicadas.



### 7.2.5 Solución

Ahora vamos a **Solution>Solve>Current LS** e iniciamos el proceso de solución de nuestro problema en el que el programa resuelve todas las ecuaciones para poder darnos los datos necesarios para nuestro estudio. Si todo ha salido bien y no ha habido ningún error nos aparecerá lo siguiente:

Y la pantalla de Ansys nos mostrará cómo queda nuestro problema con sus restricciones y las fuerzas que hemos aplicado (Figura 95).



Figura 95: Solución del problema.

Con el problema resuelto pasamos a la fase de postproceso en la que podremos ver y analizar los resultados obtenidos.

### 7.2.6 Postproceso

Esta es la fase en la que visualizaremos los datos que representarán nuestro estudio del elemento. Lo primero que queremos saber es cuál es la deformación que se produce en el eslabón con la aplicación de estas fuerzas y si esa deformación representa algún problema durante el funcionamiento

del elemento. Para esto acudimos a **General Postproc>Plot Results>Deformed Shape** y obtenemos lo siguiente (Figura 96):

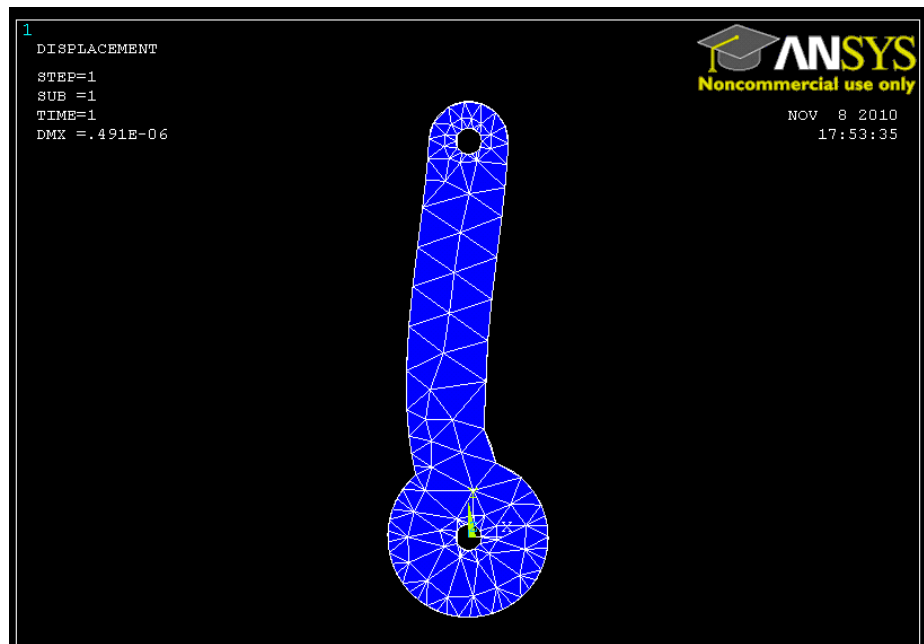


Figura 96: Deformación de la pieza.

Vemos claramente como se ha deformado el elemento. Para verlo con más claridad tenemos la opción de representar la deformación sobre el original (Figura 97). Hay que tener en cuenta que el programa exagera la representación de la deformación. Por lo tanto para conocer la deformación real deberemos acudir a los datos numéricos de la solución.

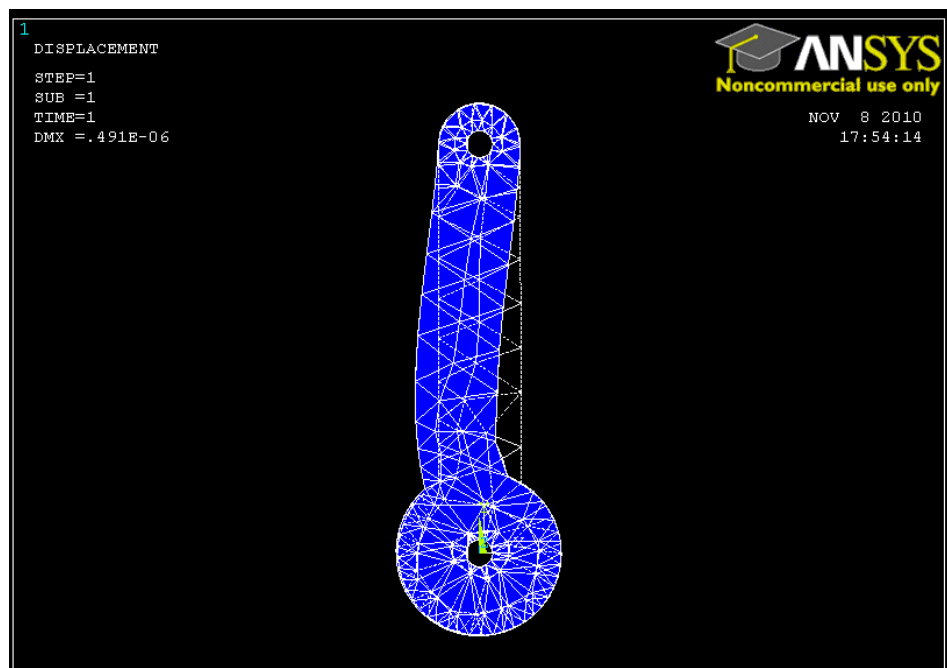


Figura 97: Deformación de la pieza 2.

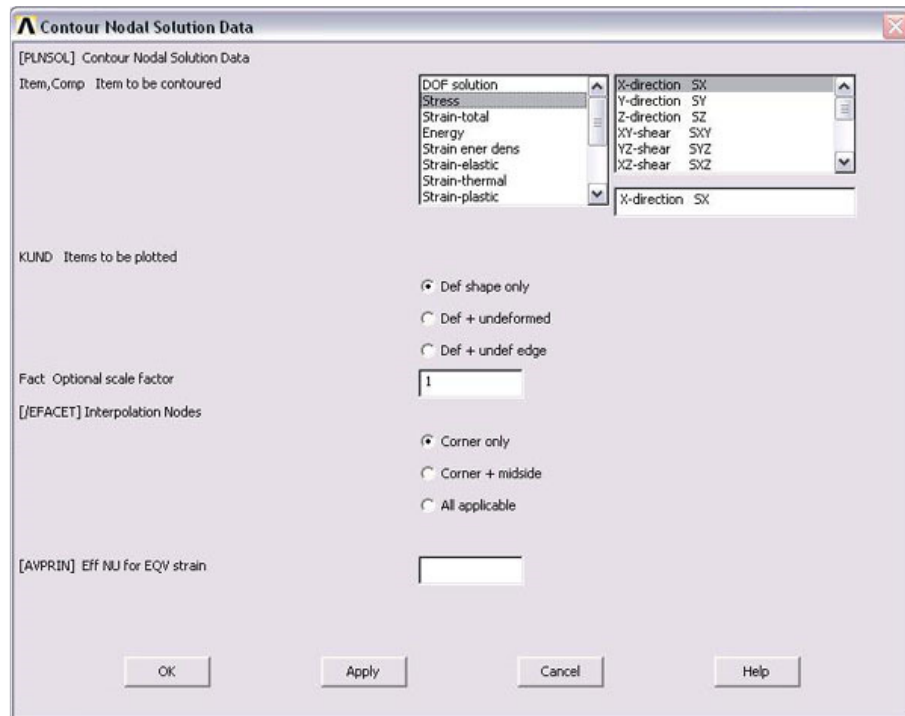
Ahora podemos ver claramente la deformación existente en el eslabón cuando se aplica una fuerza de 5N. Pero aún no sabemos de qué cantidad de desplazamiento estamos hablando. Para ello acudimos a un estudio del desplazamiento de los nodos del eslabón (Figura 98).



Figura 98: Desplazamiento de los nodos.

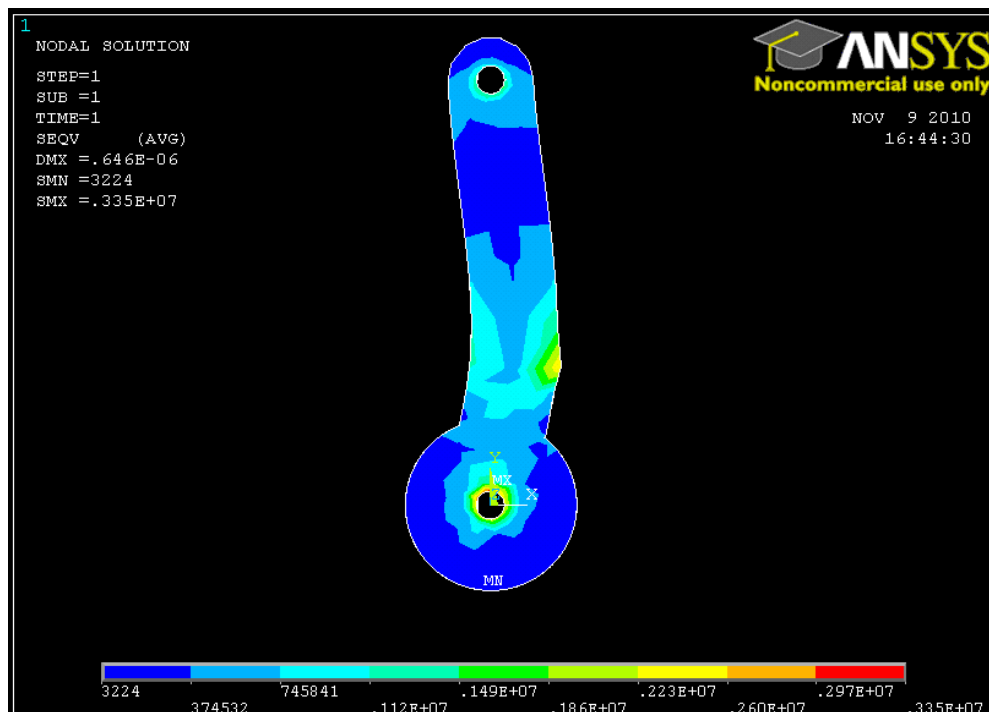
Con este análisis tenemos datos concretos del valor del desplazamiento de los nodos cuando se aplica la carga. El máximo desplazamiento que se produce (Zona Azul) es del orden de  $10^{-7}$  m. Por lo que apenas es apreciable y no representará un problema en principio durante el funcionamiento del mecanismo.

Ahora que conocemos la deformación, queremos conocer cuál es la distribución de tensiones a las que está sometida el eslabón y cuáles son los valores máximo (tracción) y mínimo (compresión) de la tensión que soporta el eslabón durante la aplicación de las cargas. Para tal efecto, utilizaremos el análisis basado en el Teorema de Von mises que nos representará un mapa con la distribución de tensiones en el eslabón. Para acceder a los datos debemos ir a **General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solution** (Figura 99).



**Figura 99: Selección del tipo de análisis.**

Si seleccionamos el análisis de tensión de Von mises obtenemos lo siguiente (**Figura 100**):



**Figura 100: Análisis de Von Mises.**

Vemos a primera vista lo que ya esperábamos, las mayores tensiones (rojo) se registran en la zona de los taladros, que como ya dijimos anteriormente

son zonas de concentración de tensiones. Nótese que los resultados que obtenemos nos dan la tensión en pascuales ( $\text{N/m}^2$ ). En la parte izquierda superior de la pantalla podemos ver los valores máximo y mínimo de la tensión en el eslabón (Figura 101).

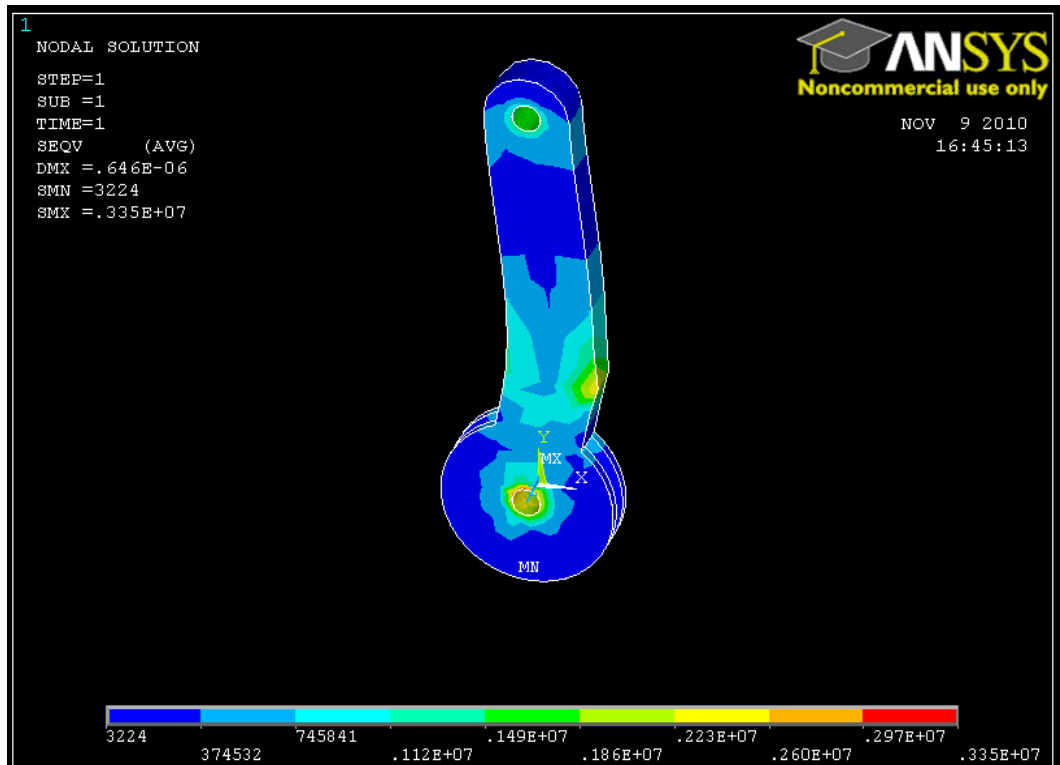


Figura 101: Análisis de Von Mises 2

El valor máximo es de  $0,335 \cdot 10^7$  Pa (3,35 Mpa) y el valor mínimo es de 3224 Pa (3,224 Kpa). Valores claramente inferiores al límite elástico del aluminio laminado (170-270 MPa) por lo que nos mantendremos en todo momento dentro del régimen elástico y no se producirá la plastificación. Los resultados para los nodos más tensionados los podemos ver e imprimir en un archivo de texto siguiendo los siguientes pasos (Figura 102): **Postproc > ListResults>NodalSolution** obteniendo lo siguiente:

```

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****

LOAD STEP=    1 SUBSTEP=    1
TIME=    1.0000 LOAD CASE=    0

   NODE    S1          S2          S3          SINT          SEQV
-----
MINIMUM VALUES
NODE      10          10          10          175          175
VALUE -0.33786E+06 -0.64639E+06 -0.26253E+07  3990.2      3469.2

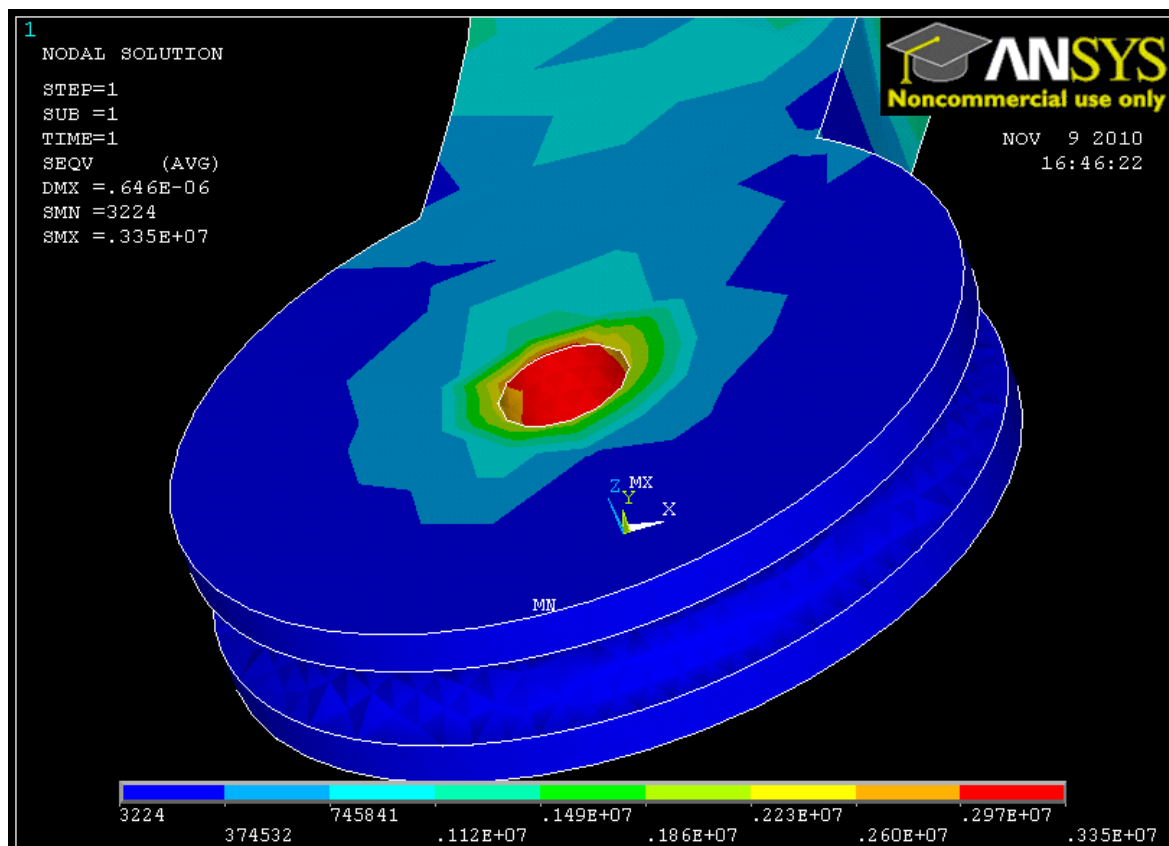
MAXIMUM VALUES
NODE      122          122          796          2872          2872
VALUE  0.28320E+07  0.18586E+07  0.13444E+06  0.37406E+07  0.32394E+07

```

Figura 102: Datos numéricos del análisis.

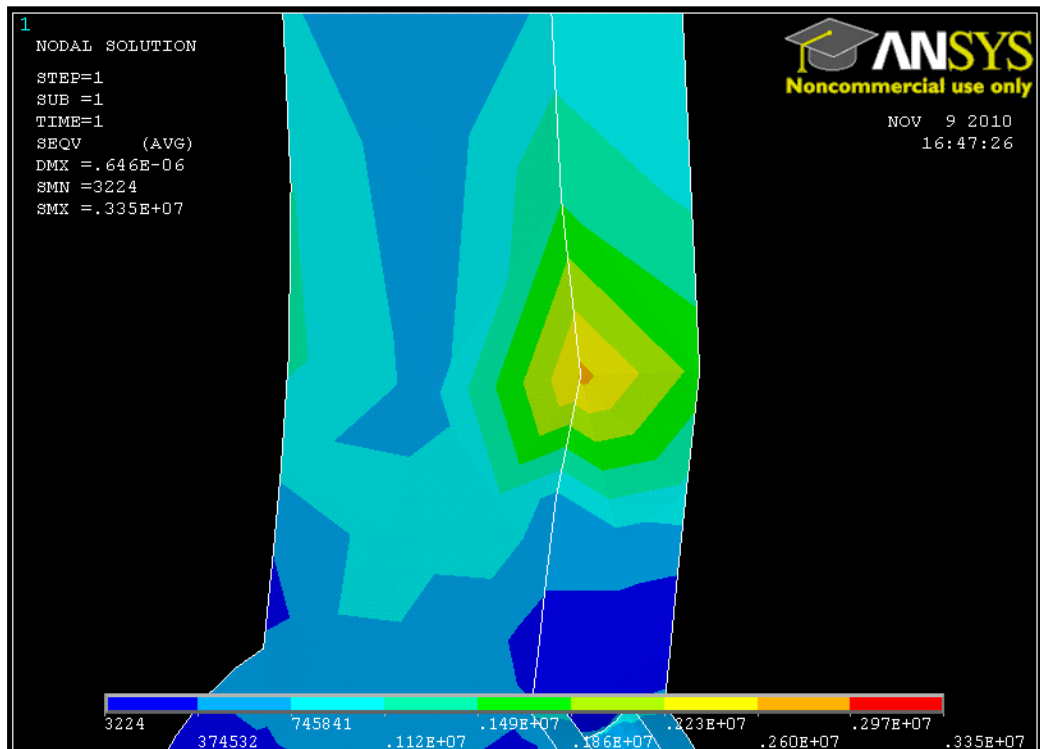
En esta tabla podemos comprobar cuales son los nodos que mayor tensión soportan e incluso obtener las coordenadas exactas de dichos nodos en el caso que la representación gráfica no sea suficientemente concluyente. En nuestro caso las imágenes hablan por sí solas.

Gracias a las herramientas de visualizado de Ansys podemos ver en detalle dónde se encuentran la zona de mayor tensión (**Figura 103**) que como ya hemos dicho se encontrará en la zona del taladro. Así haciendo uso de la herramienta de Ansys PanZoomRotate podemos ver detalladamente estas zonas girando la pieza.



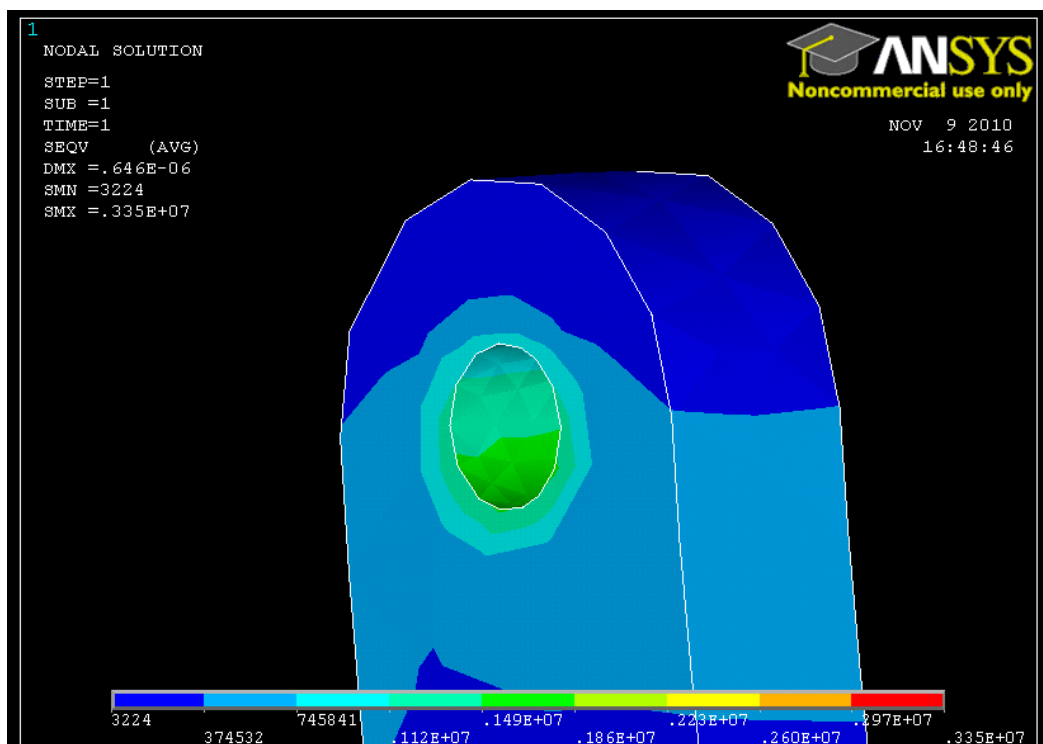
**Figura 103: Detalle del análisis de Von Mises.**

Se comprueba que ahí es dónde se encuentran las mayores tensiones y que hicimos bien en el diseño inicial de incluir un mayor diámetro a este extremo del eslabón. Sin embargo veamos ahora los otros dos puntos críticos del eslabón que son (**Figura 104**): El otro taladro y la zona de aplicación de las cargas.



**Figura 104: Detalle 2 Análisis de Von Mises.**

En la zona de aplicación de las cargas se ven colores amarillos y naranjas que nos dicen de las grandes tensiones a las que está sometida esta zona pero no llegan al rojo intenso de la zona del taladro anterior. Veamos ahora el otro extremo de la pieza donde se encuentra el otro taladro (Figura 105).



**Figura 105: Detalle tensiones en el taladro.**





Las tensiones en este punto son incluso menores que en el caso de la zona de aplicación de las cargas. Esto es debido a la distancia a la que se encuentra esta zona lo que significa que para equilibrar las tensiones en la pieza una opción sería subir el punto de aplicación de las cargas. De esta manera las tensiones sobre el taladro inferior se reducirían.

### 7.2.7 Conclusiones del análisis de elementos finitos

Tras el análisis de los resultados obtenidos mediante el estudio de las tensiones de Von mises y las deformaciones en la pieza podemos concluir que como ya preveíamos las mayores tensiones se producen en el taladro más cercano a la zona de aplicación de las cargas, es decir, a la zona donde el eslabón estará enganchado a los tendones que producirán el movimiento.

El valor máximo es de  $0,335 \cdot 10^7$  Pa (3,35 Mpa) y el valor mínimo es de 3224 Pa (3,224 Kpa). Valores claramente inferiores al límite elástico del aluminio laminado (170-270 MPa) por lo que nos mantendremos en todo momento dentro del régimen elástico y no se producirá la plastificación.

Con el estudio de las deformaciones del elemento bajo carga podemos concluir que las deformaciones producidas durante su funcionamiento no son apreciables. Debido a que estamos muy por debajo del límite elástico del material, es posible reducir el tamaño y el peso de estas piezas en un orden de magnitud elevado. Por ello se propone para futuros trabajos realizar este estudio con materiales más ligeros y eslabones de menor tamaño.

Por lo tanto, podemos considerar que este estudio ha sido una herramienta de gran ayuda a la hora de analizar el comportamiento del mecanismo durante su funcionamiento y corrobora la viabilidad del diseño propuesto.





## 8. Conclusiones



Tras la simulación del diseño propuesto y el estado del arte realizado en los diversos campos que abarca este trabajo se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- La realidad virtual es un campo emergente con multitud de aplicaciones potenciales. Por ello cualquier avance en este campo, por pequeño que sea, supondrá un gran beneficio para futuros usuarios de esta tecnología en términos de calidad y seguridad.
- Existe aún mucho trabajo de investigación por realizar, en cuanto a la optimización, en el campo de los dispositivos hápticos. Sobre todo, es necesario conseguir que estos dispositivos consigan aumentar la sensación de inmersión del usuario dentro de los entornos virtuales. Estos logros serían conseguir un peso y tamaño lo suficientemente pequeño para que no interfieran durante la inmersión del usuario provocando sensaciones contradictorias. Esto podría conseguirse con la utilización de nuevos materiales, más ligeros, para la implementación de estos nuevos dispositivos.
- La tecnología de realidad virtual junto con la tecnología háptica son actualmente la única solución potencial que permite ser capaces de manipular objetos virtuales con manos robóticas de forma diestra, bien sea directamente de forma teleoperada o bien mediante su utilización para el aprendizaje automático del propio robot.
- El dispositivo háptico desarrollado, en el presente proyecto, sigue las líneas principales de diseño de los dispositivos de este tipo más avanzados que se pueden encontrar en el estado del arte [Capítulo 4.5].
- El guante de datos permite reducir la electrónica necesaria, para medición de ángulos, en el prototipo; también reduce considerablemente el peso y volumen que ocupa el mismo. Sin embargo, se producen pequeños errores de medición debido a la presión que ejerce el dispositivo al colocarse sobre el guante.
- Las simulaciones realizadas del prototipo diseñado, demuestran desde el punto de vista cinemático y dinámico, que en términos generales, el mecanismo se comporta adecuadamente. Sin embargo, existen algunos problemas de orden menor que deberán ser corregidos, en futuros trabajos, para que dicho dispositivo no sufra desgaste mecánico con el tiempo. Estos problemas son debidos



principalmente a pequeñas discontinuidades en las aceleraciones que causan cambios muy bruscos en las sobreaceleraciones del mecanismo.

- Desde el punto de vista de la resistencia del material utilizado (Aluminio), el análisis de elementos finitos realizado demuestra que el diseño de las piezas es lo suficientemente robusto para aguantar todas las tensiones a las que se verá sometido durante su uso, ya que ninguna de estas tensiones se acerca al límite elástico durante el ensayo estático. Por lo que, se recomienda una reducción del tamaño de las piezas en futuros trabajos o cambio de material para conseguir una mayor reducción del peso del dispositivo. Sin embargo, no se ha realizado ningún tipo de ensayo dinámico de la resistencia del material. Por lo tanto, se recomienda realizar ensayos de fatiga para conocer el comportamiento del material cuando lleve muchos ciclos de trabajo.





## 9. Trabajos futuros





A la vista de las conclusiones obtenidas y teniendo una visión global del problema y sus soluciones, se recomienda que en los futuros trabajos que se vayan a realizar como continuación del presente proyecto y que podrían ser útiles para completar los resultados obtenidos en el presente proyecto:

- Rediseño de la cadena cinemática del mecanismo para reducir las sobreaceleraciones que se han observado durante el análisis cinemático.
- Rediseño de los apoyos del mecanismo para que no interfieran en las medidas del guante de datos, reduciendo los errores en las medidas que esto pudiera producir.
- Realización de un estudio paramétrico para las longitudes de todos los eslabones del mecanismo viendo cómo afectan estos parámetros en el comportamiento cinemático y dinámico. El objetivo es determinar los parámetros óptimos que mejoren el comportamiento del dispositivo en función de los motores escogidos y el rango de funcionamiento de la mano humana.
- Optimización del diseño desde el punto de vista de volumen y peso hasta valores cercanos a los 100g, aconsejados por los estudios realizados en el capítulo 4.3, con el objetivo de reducir la inercia aparente provocada por el peso del dispositivo. Se conseguirá reduciendo el tamaño de los eslabones, a la vista de los resultados obtenidos en el análisis de elementos finitos e implementando el dispositivo en nuevos materiales con mejores propiedades en relación peso/rigidez.
- Diseño de piezas de sujeción del dispositivo ergonómicas para facilitar su adaptación a la mano humana utilizando materiales termoplásticos.
- Desarrollo de la electrónica de acondicionamiento necesaria. Será necesario incluir sensores, buses de comunicación, microcontroladores, etc.
- Mejora de la medida de fuerza en las yemas de los dedos mediante la inclusión de sensores de presión capacitivos o resistivos sobre las mismas. Esto ayudará a solucionar el problema de medición de fuerza existente en el concepto inicial, donde los motores escogidos



se emplean para medir el par aplicado. Dicho problema es causado principalmente por la fricción existente en los cables *bowden* y que impiden tener una sensibilidad aceptable para tareas de manipulación fina.

- Estudio de técnicas de control de teleoperación que permitan que la sensación háptica sea lo más realista posible.
- Integración del dispositivo en un entorno de simulación. Actualmente, el *RoboticsLab* está trabajando con el simulador robótico *OpenRave*. Debido a sus características generales y a que es de código abierto se recomienda su utilización.





## **8. Presupuesto detallado**



## 8.1 Elaboración del proyecto técnico

Descripción	Precio/hora	Nº horas	Precio (€)
<b>Introducción</b>	20 €/h	16 h	320
<b>Estado del arte</b>	20 €/h	30 h	600
<b>Diseño CAD</b>	20 €/h	35 h	700
<b>Análisis cinemático y dinámico</b>	20 €/h	28 h	560
<b>Análisis de elementos finitos</b>	20 €/h	15 h	300
<b>Planos</b>	20 € /h	16 h	320
<b>Subtotal</b>		<b>140 h</b>	<b>2800 €</b>



## 8.2 Componentes

Elemento	Precio (Unidad)	Nº de unidades	Total
<b>Plancha de aluminio (400 x 200 x 2 mm)</b>	12,5 €	2	25 €
<b>Tornillo M2 DIN 933</b>	0,15€	18	2,7€
<b>Tornillo M3 DIN 933</b>	0,20€	12	2,4€
<b>Ejes poleas 2 mm</b>	0,85€	25	20,95€
<b>Cables bowden M2x 550mm</b>	7.5€	15	112.5€
<b>Escuadras</b>	5€	20	100€
<b>Guante Cyberglove</b>	14.900€	1	14.900€
<b>Férula Termoplástica</b>	21.29€	1	21.29€
<b>Poleas 2 mm</b>	0,85€	18	15€
<b>Separadores para tornillo,M3x2mm</b>	0,20€	50	3,5€
<b>Pernos M6X40mm</b>	0,32€	25	8€
<b>Subtotal</b>	<b>15.211,34€</b>		



### 8.3 Mano de obra (trabajo en taller)

Descripción	Precio/hora	Nº horas	Precio (€)
Mecanizado de eslabones	25 €	5h	125
Mecanizado de centros de rotación	25 €	8h	200
Mecanizado de soporte de actuadores	25 €	12h	300
Montaje de ejes y poleas	25 €	5.5h	137.5
Montaje de exoesqueleto	25 €	3h	75
Montaje de cables bowden	25 €	3h	75
Montaje de los actuadores	25 €	6h	150
Subtotal		29h	1062.5€

**TOTAL = 19073,84 €**





# Bibliografía



- [1] G. Burdea, “Force and Touch Feedback for Virtual Reality,” New York: Wiley, 1996.
- [2] Jones, H. (1995): “Virtual reality applications”. Londres, Academic Press.
- [3] McCarthy M., Descartes, A. (1998): “Reality Architecture”. Londres, Prentice-Hall.
- [4] Pérez, G. (1995): "Introducción a la Realidad Virtual".
- [5] Tanaka Y, Yamauchi H, Amemiya K, “Wearable haptic display for immersive virtual environment”. 2000, pp: 309–314.
- [6] Macdonald, V. (1994): Interacting with virtual environments. Chichester, Wiley.
- [7] Wright, A.K., Stanisic, M.M, “Kinematic mapping between the EXOS Handmaster exoskeleton and the Utah/MIT dextrous hand,” IEEE International Conference on Systems Engineering, 1990, pp: 101-104.
- [8] Rohling, R.N, Hollerbach, J.M., Jacobsen, S.C., 1993, “Optimized Fingertip Mapping: A General Algorithm for Robotic Hand Teleoperation,” Presence, vol. 2 no. 3, pp. 203-220.
- [9] H. Iwata, T. Nakagawa, and T. Nakashima, “Force display for presentation of rigidity of virtual objects,” J. Robot. Mechatronics, vol. 24, no. 1, pp. 39–42, 1992.
- [10] P. Coiffet, M. Bouzit, and G. Burdea, “The LRP dextrous hand master,” presented at the Virtual Reality Syst. Fall 1993 Conf., Sig Adv. Appl., New York, Oct. 1993.
- [11] Y. Kunii, Y. Nishino, T. Kitada, and H. Hashimoto, “Development of 20 dof glove type haptic interface device—Sensor glove II,” in Proc. IEEE/ASME.
- [12] CyberGrasp Manual, version 2.0, Immersion Corporation, San Jose, CA, 2007.



- [13] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu, and R. Boian, “The Rutgers master II—New design force-feedback glove,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 7, no. 2, pp. 256–263, Jun. 2002.
- [14] T. Koyama, I. Yamano, K. Takemura, and T. Maeno, “Multi-fingered exoskeleton haptic device using passive force feedback for dexterous teleoperation,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, Oct. 2002, pp. 2905–2910.
- [15] K. Koyanagi, Y. Fujii, and J. Furusho, “Development of VR-STEF system with force display glove system,” presented at the *Int. Conf. Artif. Reality Telexistence*, Christchurch, New Zealand, Dec. 2005.
- [16] K. Sato, K. Minamizawa, N. Kawakami, and S. Tachi, “Haptic telexistence,” presented at the *Int. Conf. Comput. Graph. Interactive Tech.*, ACM SIGGRAPH 2007, San Diego, CA.
- [17] Bruno M. Jau , “ Man-Equivalent Telepresence Through Four Fingered Human-Like Hand System”. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.1992.
- [18] Vince, J. (1998): *Virtual Reality Fast*. Berlin, Springer.
- [19] D. C. Johnson, and D. W. Repperger, “Development of a mobility assist for the paralyzed, amputee, and spastic patient,” *IEEE*, pp. 67-70R, 1996.
- [20] Y. Umetani, Y. Yamada, T. Morizono, T. Yoshida, and S. Aoki, “Skil Mate” wearable exoskeleton robot, in *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Tokyo, Japan, pp. 984-988, 1999.
- [21] K. Kuribayashi, M. Takahashi and T. Taniguchi, “An upper extremity prosthesis using SMA actuator,” *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 52-57, 1992.
- [22] Carlo Alberto Avizzano, Federico Barbagli, Antonio Frisoli, Massimo Bergamasco, “The Hand Force Feedback: Analysis and Control of a Haptic Device for the Human Hand”, 1999.
- [23] Zhongsheng Sun, Gang Bao, Qingjun Yang and Zuwen Wang, “Design of a novel force feedback dataglove based on pneumatical artificial muscles”, *IEEE* 2006.



[24] [http://www.mathworks.com/products/simmechanics/download\\_smlink.html](http://www.mathworks.com/products/simmechanics/download_smlink.html)

[25] Ansys, Inc. Theory Reference.

[26] MASSIE T.H., SALISBURY J.K. "The Phantom haptic interface: a device for probing virtual objects" Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, symposium on Haptic interfaces for virtual environments and teleoperator systems. 1994.

[27] ELLIS R.E., ISMAEIL O.M. "Design and evaluation of a high performance haptic interface" Robotics vol 4 pp 321-327, 1996.

[28] ALHALABI M.O, DANIULAITIS V., KAWASAKI H. "Haptic Interaction Rendering Technique for HIRO", 2004.

[29] ALHALABI M.O, DANIULAITIS V., KAWASAKI H. "Development of five-fingered haptic interface: HIRO-II". Proceedings of the 2005 international conference on Augmented tele-existence.

[30] R. Howe and M.R. Cutkosky, "Integrating Tactile Sensing with Control for Dextrous Manipulation," Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Motion Control, 1990.



# Planos del mecanismo

